

TEMPERATURA DEL SUELO EN LAS CUMBRES DE LA SIERRA DE GUADARRAMA



Alumna: María Palomo Segovia
Directora del trabajo: Dra. Nuria Andrés de Pablo
Curso: 2011 - 2012
Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Geografía e Historia.
Departamento de Análisis Geográfico Regional.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	6
2.1. Aspectos geomorfológicos	8
2.2. Aspectos climatológicos	14
2.3. Aspectos biogeográficos	27
2.4. Dinámica geoecológica de los nichos nivales	32
3. METODOLOGÍA Y DATOS	38
4. RESULTADOS	46
4.1. Temperatura del aire	46
4.2. Temperatura media diaria del suelo	49
4.3. Temperatura media, media de las extremas y extremas absolutas mensuales del suelo	59
4.4. Variación vertical de la temperatura media estacional del suelo	70
4.5. Gradiente vertical de temperatura del suelo	78
4.6. Oscilación térmica del suelo	81
4.7. Días con suelo helado	85
4.8. Ciclos de hielo - deshielo	88
5. DISCUSIÓN	90
6. CONCLUSIONES	99
BIBLIOGRAFÍA	104
INDICE DE FIGURAS	110

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de las variables meteorológicas en áreas de montaña es un tema de interés creciente no sólo para conocer las características climatológicas propias de estos espacios, sino también para poder evaluar su influencia sobre las regiones limítrofes y comprender el papel que desempeñan en el sistema climático planetario.

Numerosos procesos característicos de las zonas de montaña están estrechamente ligados a las variables meteorológicas. En concreto, algunos tipos de erosión y de movimientos en masa; la presencia de *permafrost*; la evolución de los suelos y el tipo y dinámica de la vegetación están condicionados por variables como el comportamiento térmico del suelo o la presencia de nieve y sus características.

Las temperaturas del suelo dependen de factores tan variados como los topográficos, geomorfológicos, meteorológicos, edáficos y biogeográficos. En espacios con topografía abrupta, la orientación de una ladera puede ser determinante en la temperatura del suelo, sobre todo en las capas superiores de éste. Otras características del suelo como su composición, estructura, presencia de capas heladas y contenido en agua son también condicionantes en el régimen térmico del suelo.

En cuanto a los factores meteorológicos, la temperatura de las capas superficiales del suelo se ven fuertemente influenciadas por la temperatura del aire mientras que para las capas más profundas esta influencia es menor (Thorn y Hall, 1980). La relación entre la temperatura del suelo y la del aire, no es sencilla. Los cambios en la temperatura del aire no siempre se traducen en variaciones en la temperatura del suelo y, además, no afectan a todas las profundidades por igual.

El manto de nieve y sus características es otro de los factores que condiciona el régimen térmico del suelo. La nieve, en particular la nieve seca, al ser un material con un gran contenido en aire, ralentiza la conducción del calor y actúa como una capa aislante (Thorn y Hall, 1980). Sin embargo, esta capacidad aislante de la nieve depende del espesor del manto. Mackay y Mackay (1974) comprobaron que las temperaturas del suelo son más sensibles a los cambios en el espesor del manto cuanto menor es éste, esto es, los mantos de pocos centímetros no aíslan el suelo de los cambios térmicos del aire mientras que, para espesores mayores, el suelo queda prácticamente aislado térmicamente por el manto de nieve. Otros autores (Sokratov y Barry, 2002) han llegado a definir la variación intra estacional de la importancia del manto como aislante térmico, estableciendo valores mínimos de espesor a partir de los cuales la capacidad como aislante de la nieve se mantiene constante.

La presencia de un manto de nieve sobre el suelo tiene otras consecuencias para éste, como el aporte de agua líquida en los momentos de la fusión o la modificación del balance radiativo de la superficie, debido a su elevado albedo.

Además, en el contexto actual de los estudios de cambio climático, el tema del estudio de la tendencia de las series de temperatura en entornos de montaña es particularmente importante. Pequeñas variaciones pueden suponer grandes cambios en elementos tales como la disponibilidad de recursos hídricos, la distribución altitudinal de especies o las actividades económicas que se llevan a cabo en medios de montaña (IPCC, 2008).

Los sistemas montañosos de la Península Ibérica presentan un clima propio de áreas templadas mediterráneas y entre sus características están la fuerte variación inter e intra anual de variables como la temperatura o las precipitaciones, así como la presencia de un manto de nieve más o menos permanente durante el invierno sólo en cotas elevadas. La concurrencia de todos estos factores tiene importantes consecuencias en la evolución del relieve. Así, las oscilaciones bruscas de la temperatura del aire o las precipitaciones intensas favorecen la gelifracción, el desencadenamiento de procesos erosivos en laderas, desprendimientos y deslizamientos que ocasionan modificaciones rápidas del entorno geomorfológico. La presencia de nieve en el suelo y las variaciones en la temperatura de éste también influyen en la ocurrencia de estos procesos. En concreto, la temperatura del suelo actúa como un factor crítico en el desarrollo de distintos procesos geomorfológicos condicionando los ciclos de hielo/deshielo del agua en el suelo y la existencia de agua líquida, factores que son determinantes en el desencadenamiento de procesos de ladera y en la instalación de la vegetación y, finalmente, en aspectos tan variados como la configuración del paisaje o la exposición a ciertos riesgos naturales (Thorn, 1978).

El Macizo de Peñalara, situado en el Sistema Central (figura 1), constituye un ejemplo significativo de territorio cuyo relieve es el resultado de la acción de distintos procesos de tipo estructural y climático. A finales del Pleistoceno este territorio se vio afectado por una acción glaciaria marginal. Los hielos cubrieron esta zona alcanzando un espesor de hasta 300 metros en algunos puntos y, posteriormente, el retroceso de estos glaciares dejó como resultado un conjunto de morfologías glaciares bien conservadas.

El Macizo forma parte de la Sierra de Guadarrama que, a su vez, constituye una de las unidades que componen el Sistema Central. Los límites de esta Sierra están marcados por la depresión de Buitrago a este y las depresiones de San Martín de Valdeiglesias - El Tiemblo - Cebreros, la del alto río Moros y la Sierra de Malagón por el oeste (Pedraza, 1994). Las cuerdas de la Sierra de Guadarrama presentan altitudes que permiten caracterizarla como alta montaña de clima mediterráneo (Sanz, 1988).

La línea de cumbres de esta cadena constituye, en muchos tramos, el límite entre las comunidades autónomas de Madrid y de Castilla y León.

El Parque Natural de la Cumbre, Circo y Lagunas de Peñalara, con 714 hectáreas, fue declarado en la Ley 6/1990 y forma parte de la red de Espacios Naturales Protegidos de la Comunidad de Madrid. Con esta declaración se reclasificaba la figura de protección original de 1930, que era la de Sitio Natural de Interés Nacional. El Parque Natural de Peñalara tiene

por objetivo la conservación de los ecosistemas más representativos de la alta montaña de la región, ya que en él se encuentra la cima más elevada de la provincia (Pico Peñalara, 2.428 m).



Figura 1: Localización geográfica del Parque Natural de Peñalara en el contexto de la Península Ibérica y del Sistema Central.

Una de las características del Parque es su gran heterogeneidad natural. La presencia de fuertes gradientes altitudinales y de factores locales de tipo geomorfológico, edáfico o hidrológico tiene como resultado, en esta área, la existencia de distintas unidades geocológicas de elevado interés natural y paisajístico que son objeto de conservación y protección. A esta riqueza natural, el Macizo de Peñalara suma su interés cultural, ya que constituye un lugar emblemático de la historia del excursionismo y el montañismo y ha sido objeto del interés científico de numerosos autores desde mediados del siglo XIX, como lo demuestran los estudios pioneros realizados por de Prado (1864), Baysselance (1884) y Macpherson (1893) entre otros.

Todos estos factores hacen que el Macizo de Peñalara suponga un espacio idóneo para llevar a cabo investigaciones sobre la interrelación entre los distintos procesos naturales (geomorfológico, edáfico, meteorológico) en un marco de alta montaña mediterránea en el que domina el modelado glaciar y periglacial.

El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar una pequeña área del Macizo de Peñalara desde el punto de vista de las temperaturas del suelo utilizando técnicas ya establecidas para otras zonas. En concreto, se analizarán, para cada una de las estaciones de observación:

- Los valores de la temperatura del aire y del suelo a distintas profundidades para las temporadas 2001/2002 a 2010/2011.
- Los valores medios diarios, mensuales y anuales de las temperaturas del suelo a distintas profundidades.
- Los valores medios diarios, mensuales y anuales de la temperatura del aire.
- La relación entre la temperatura del aire y las temperaturas del suelo registradas a distintas profundidades.
- La variación espacial de las temperaturas del suelo, tanto en la vertical, como en la horizontal.
- La variación temporal de las temperaturas del suelo.

Además, a partir del análisis de estos valores y de su evolución en el tiempo se pretende:

- Realizar una descripción detallada del área próxima a las estaciones de medida en lo que se refiere al comportamiento térmico del suelo.
- Relacionar los resultados obtenidos con otras variables como la presencia de nieve en el suelo, el comportamiento de los vientos dominantes, la actividad geomorfológica o la presencia de vegetación.
- Realizar una comparación de los resultados obtenidos con los de otras zonas próximas de características similares.

Para alcanzar estos objetivos se ha utilizado la información de temperatura del suelo registrada en dos parcelas de estudio. Estas dos parcelas están ubicadas en la cabecera del circo glaciar de Dos Hermanas, próxima al área de cumbres. A pesar de estar separadas una distancia inferior a 100 metros, las dos parcelas presentan diferencias muy marcadas en lo que se refiere a espesor del manto de nieve y persistencia de éste, lo que permite poner en relación los resultados obtenidos con la innivación. La responsabilidad sobre la instalación y el mantenimiento de estas estaciones de observación corre a cargo del Grupo de Geografía Física en Alta Montaña de la Universidad Complutense de Madrid.

El trabajo se ha estructurado en distintos capítulos. En el capítulo 2 se lleva a cabo una descripción exhaustiva del área de experimentación, exponiendo sus características geológicas y poniéndolas en relación con las de su entorno más inmediato. Para la realización de esta descripción ha sido necesario realizar previamente un análisis bibliográfico sobre los trabajos realizados por distintos autores que han caracterizado esta área. En el capítulo 3 se expone un análisis de las metodologías establecidas por distintos autores para el estudio de las temperaturas de suelo. La mayor parte de las metodologías definidas para el estudio de las temperaturas de suelo están orientadas a la detección de

suelos helados, capas de *permafrost*, determinación de su evolución y extensión y valoración de las técnicas aplicadas para alcanzar estos objetivos. Además, en el capítulo 3 se describen los datos utilizados en este estudio, la metodología y el equipamiento utilizados para su obtención, los distintos procesos de depuración a que han sido sometidos, las series resultantes con las que se ha trabajado y los análisis que se han llevado a cabo con los datos depurados. En el capítulo 4 se exponen los resultados obtenidos del análisis de los datos, describiendo los valores medios de las temperaturas del suelo a distintas profundidades y su relación de estas temperaturas con la temperatura del aire, la variación espacial de las temperaturas del suelo, tanto en la vertical como en la horizontal así como su variación temporal, contextualizando todos estos resultados en el área de experimentación. El capítulo 5 se destina a la valoración de la representatividad de los resultados en relación con su entorno geográfico por un lado y con su contexto metodológico por otro. Finalmente, en el capítulo 6 se exponen, de forma sucinta, las principales conclusiones obtenidas en el estudio, tanto en el aspecto metodológico y técnico, como en los aspectos geoecológicos.

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio elegida para llevar a cabo el estudio de las temperaturas de suelo en el Macizo de Peñalara (figura 2) se encuentra en el entorno de las cumbres más elevadas en el que aparecen diversos ejemplos de relieve resultado de los modelados periglaciares y glaciares, de forma que esta área se puede considerar representativa de los sectores de cumbre de la Sierra de Guadarrama.

La estación de medida se localiza en el extremo septentrional del circo glaciar de Dos Hermanas, próximo a la zona de cumbres. En esta zona se han establecido dos parcelas en las que se lleva a cabo el registro de los datos de temperatura del suelo. A pesar de la proximidad de estas estaciones, separadas menos de 100 metros, las diferencias existentes entre los dos puntos de medida sobre todo en lo que se refiere a la duración y cantidad de innivación tienen consecuencias significativas en los resultados.

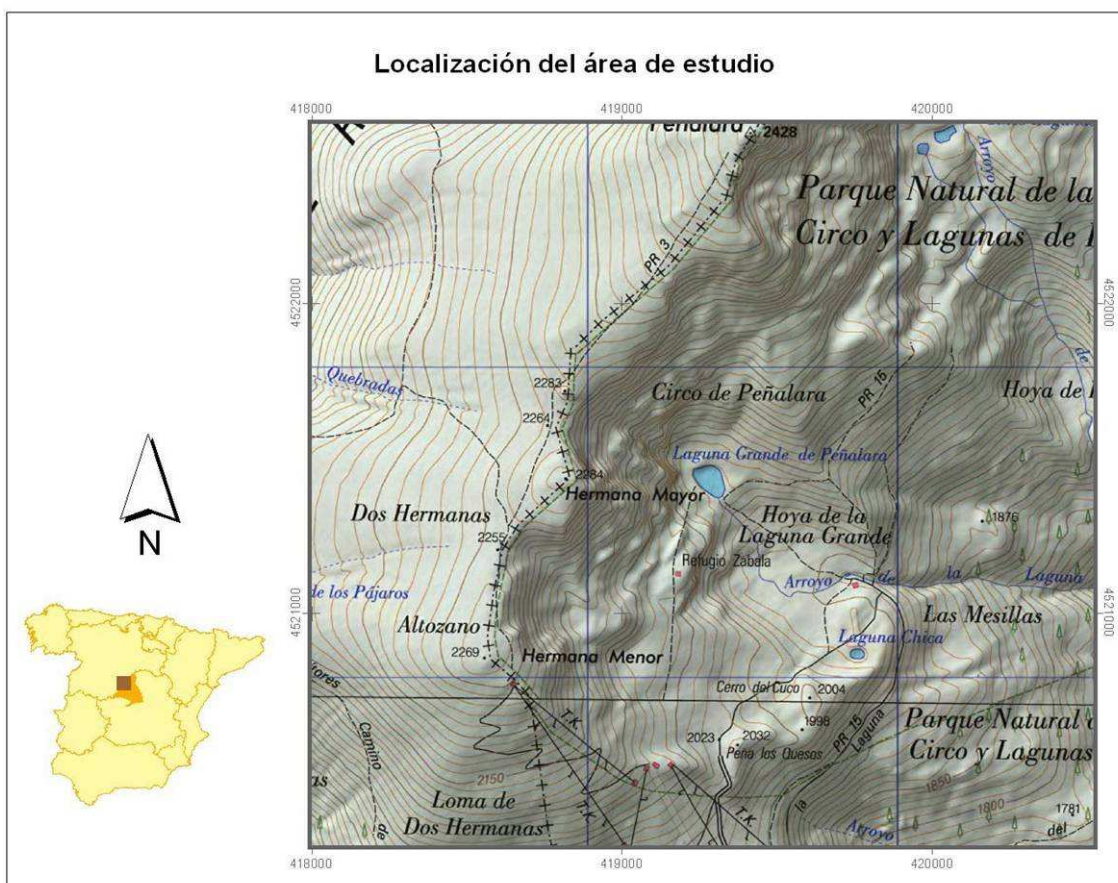


Figura 2: Localización del área de estudio.

El Macizo de Peñalara constituye un ejemplo de espacio de montaña en zona templada con clima mediterráneo cuyo relieve es el resultado tanto de procesos estructurales como climáticos entre los que destaca la acción glaciaria marginal que actuó sobre la cadena a finales del Pleistoceno. El resultado de todos estos procesos tiene como consecuencia la existencia de fuertes asimetrías en el Macizo que permiten diferenciar en él distintas unidades en función de las características geoecológicas dominantes. El área de estudio se encuentra situada en la zona de contacto de varias de estas unidades, lo que la convierte en un espacio idóneo para el análisis y para la descripción de este territorio.

Desde mediados de siglo XIX, son numerosos los autores que se han ocupado de diversos aspectos del Macizo de Peñalara. Obermaier y Carandell, en 1917, fueron los primeros en describir, de forma sistemática, las morfologías glaciares existentes en la Sierra de Guadarrama, y Franzle, en 1959, realizó un pormenorizado análisis en el que no sólo se detallaban las morfologías glaciares sino, sobre todo, las generadas a partir de los procesos periglaciares ocurridos en la Sierra. Después de estos primeros estudios, autores como Vidal Box (1948), Bullón (1988), Sanz (1988) o Pedraza *et al.* (2004) han analizado las características del Macizo como relieve heredado de la acción climática glaciaria y periglaciaria; Asensio y Ontañón (1972 y 1975), Bullón (1977, 1988 y 1995), Sanz (1979, 1986 y 1988), Palacios y García (1997a), Marcos y Palacios (2004), Muñoz y García (2004), Palacios y Andrés (2000) y Palacios *et al.* (2003 y 2004) se han ocupado de los procesos geomorfológicos que tienen lugar en la actualidad; Bullón (1995), Muñoz *et al.* (1995), Palacios y García (1997a), Palacios y García (1997b), Palacios y Andrés (2000), Palacios *et al.* (2003 y 2004), Marcos y Palacios (2004), Muñoz y García (2004), Andrés y Palacios (2004 y 2005) y Andrés *et al.* (2007) han estudiado la relación entre diversos agentes geoecológicos que actúan en el macizo, haciendo especial hincapié en la relación entre geomorfología, nieve y vegetación, y otros autores (Rivas - Martínez, 1963 y 1982; Sanz, 1979 y 1988; Bullón, 1988; Fernández-González, 1988, 1991 y 1999; Rivas - Martínez *et al.*, 1990 y 1999; Luceño y Vargas, 1991; Gavilán *et al.*, 1998; Andrés y Palacios, 2004; Muñoz y García, 2004; Palacios *et al.*, 2003 y 2004) se han ocupado de la descripción del Macizo en relación con su vegetación y la evolución de ésta. Todos estos trabajos han permitido alcanzar un conocimiento exhaustivo del Macizo de Peñalara en sus distintos aspectos geográficos.

2.1. Aspectos geomorfológicos.

El relieve del Macizo de Peñalara es el resultado de distintos procesos geológicos y climáticos ocurridos a lo largo de los tiempos. En la zona existió, a finales del Paleozoico, una penillanura de materiales gneisecos sobre la que actuaron los movimientos tectónicos del Terciario para generar un relieve germánico de *horsts* y *grabens*, constituidos básicamente por gneises glandulares con intrusiones graníticas.

En épocas preglaciares el Macizo estuvo afectado por pulsaciones frías y secas que provocaron la formación de campos de bloques por procesos de macrogelifración de la roca (Sanz, 1986), la aparición de un manto de alteración de materiales finos, la formación de *permafrost* en las vertientes menos expuestas a la radiación solar (Palacios y Andrés, 2000) y la reordenación de los bloques en el manto de alteración y su ascenso a través de los materiales más finos hasta llegar a la superficie quedando ésta cubierta por un conjunto de grandes bloques que, posteriormente, al deslizarse por la ladera formaron conjuntos de lenguas y lóbulos (Franzle, 1959). Estas formaciones (manto de alteración y campos de bloques) perduran en la actualidad sobre todo en las vertientes occidentales del macizo.

El descenso de las temperaturas y la abundancia de precipitaciones sólidas que tuvo lugar entre 21.000 a 23.000 años antes de la actualidad propiciaron la instalación de glaciares en la sierra (Palacios y Andrés, 2005). La localización de estos glaciares estuvo condicionada por la configuración de los sistemas meteorológicos que produjeron las precipitaciones y por la topografía previa del terreno. Las masas de nieve y hielo más importantes se acumularon sobre las cabeceras de los barrancos en las laderas situadas a sotavento de los vientos dominantes, es decir, en la vertiente de la sierra orientada al este y al noreste. En estas laderas se acumulaba y depositaba la nieve barrida por el viento desde la ladera occidental y desde las cumbres, sobre todo en las zonas con una topografía deprimida, de forma que el flujo de los hielos pleistocenos se adaptó con frecuencia a formas previas de origen fluvial o nival, remodelándolas en artesas (Obermaier y Carandell, 1917). Además, las bajas temperaturas reinantes y la escasa exposición a la radiación solar favorecían la persistencia del manto nivoso y su conversión en masas de hielo (Obermaier y Carandell, 1917). De esta forma, la distribución de los glaciares en la Sierra presenta una acusada asimetría. Los glaciares más activos se encontraban en las laderas con orientación este, protegidos de los vientos dominantes y de la máxima radiación solar, y las laderas occidentales se caracterizaban por la escasa acumulación de nieve y hielo.

Debido a su escasa longitud, los glaciares de la Sierra de Guadarrama se clasifican dentro del tipo Pirenaico. La altura mínima alcanzada por el hielo dependió no sólo de la altura del circo y su orientación, sino también de la topografía de la cuenca en la que el hielo se instaló (Sanz, 1988). Así el glaciar de Peñalara tuvo una extensión máxima de 1,65 km y su altitud mínima alcanzada se ha estimado en 1.840 metros (Sanz, 1988).

La asimetría en la distribución de los glaciares tuvo importantes consecuencias geomorfológicas. En las vertientes orientales, además de provocar la aparición de morfologías como morrenas, circos, depresiones etc, los glaciares barrieron el manto de alteración previo eliminándolo en muchas áreas y reduciéndolo considerablemente en otras. En las laderas orientadas al oeste la presencia glaciaria fue menos importante, por lo que el manto de alteración permanece inalterado en la mayor parte de estos sectores.

La retirada de los glaciares se produjo, de forma lenta, entre hace 19.000 y 16.000 años y, más rápidamente a partir de ese momento (Palacios *et al.*, 2012). A partir de ese momento el relieve de la zona ha registrado pocas variaciones. La desaparición de hielo estuvo acompañada por una actividad periglaciaria intensa. La pared del fondo de los circos y los bordes de los escalones han sufrido una importante crioclastia, que ha dado lugar a la formación de taludes de pedreras cada vez más extensos. En los circos en los que el hielo se retiró pronto la actividad periglaciaria ha sido larga y la extensión de los campos de bloques ha terminado por producir una homogeneización de las laderas eliminando los resaltes generados por la actividad glaciaria, mientras que en aquellos en los que la presencia del hielo fue más larga, como el de Peñalara, estos procesos han sido limitados y conservan la morfología glaciaria (Sanz, 1988).

La nieve ha sido otro de los agentes clave en el modelado actual del terreno. En primer lugar, la nieve constituye el principal aporte de agua en ámbitos de montaña de forma que la distribución espacial de la nieve condiciona la del aporte de agua al suelo (White, 1976). Además, la nieve funciona como una capa aislante debido a la cantidad de aire que contiene, suavizando la influencia de los cambios de temperatura del aire en la temperatura del suelo (Thorn y Hall, 1980). La distribución de nieve puede ser la causa de la distribución de otros procesos geomorfológicos como la acción torrencial, el lavado de materiales finos y el movimiento de bloques, la solifluxión, la gelifracción y la formación de movimientos en masa (Thorn, 1976 y 1979; Ballantyne, 1978; Strömquist, 1985; Nyberg, 1991; entre otros). En ocasiones, la nieve también representa un importante papel en la meteorización de la roca, ya que la acidez de las aguas de deshielo favorece la alteración química (Williams, 1949; Rapp, 1960; Reynolds, 1971; Thorn, 1976). Finalmente, en ámbitos de montaña mediterránea como el que nos ocupa, la nieve aísla el suelo de las lluvias primaverales, limita el desarrollo de la vegetación al periodo estival y expone el suelo poco estabilizado a la erosión causada por las lluvias otoñales (Palacios y Andrés, 2000).

La acción fluvial también ha originado variaciones en el relieve. Los torrentes se han instalado en las laderas incidiendo sus cauces en el manto de alteración y en los materiales de las morrenas y mostrando en algunos puntos un incipiente proceso de jerarquización (Palacios y Andrés, 2000).

El resultado de esta evolución hace que una de las características principales del Macizo de Peñalara en la actualidad sea su marcada asimetría este - oeste en su aspecto geomorfológico, que se refleja en otras facetas como la distribución y persistencia del manto de nieve o en las relacionadas con la distribución de la vegetación, ya que son todos ellos factores interrelacionados.

El área de estudio se ubica en el sector meridional del Macizo de Peñalara con la estación de medida localizada en la cabecera de uno de los circos glaciares orientados al este y muy próxima al área de cumbres. Las principales unidades de relieve que se distinguen en el área de estudio son las áreas preglaciares, las áreas glaciadas y aquellos espacios en los que son especialmente significativos los procesos post glaciares (figura 3).

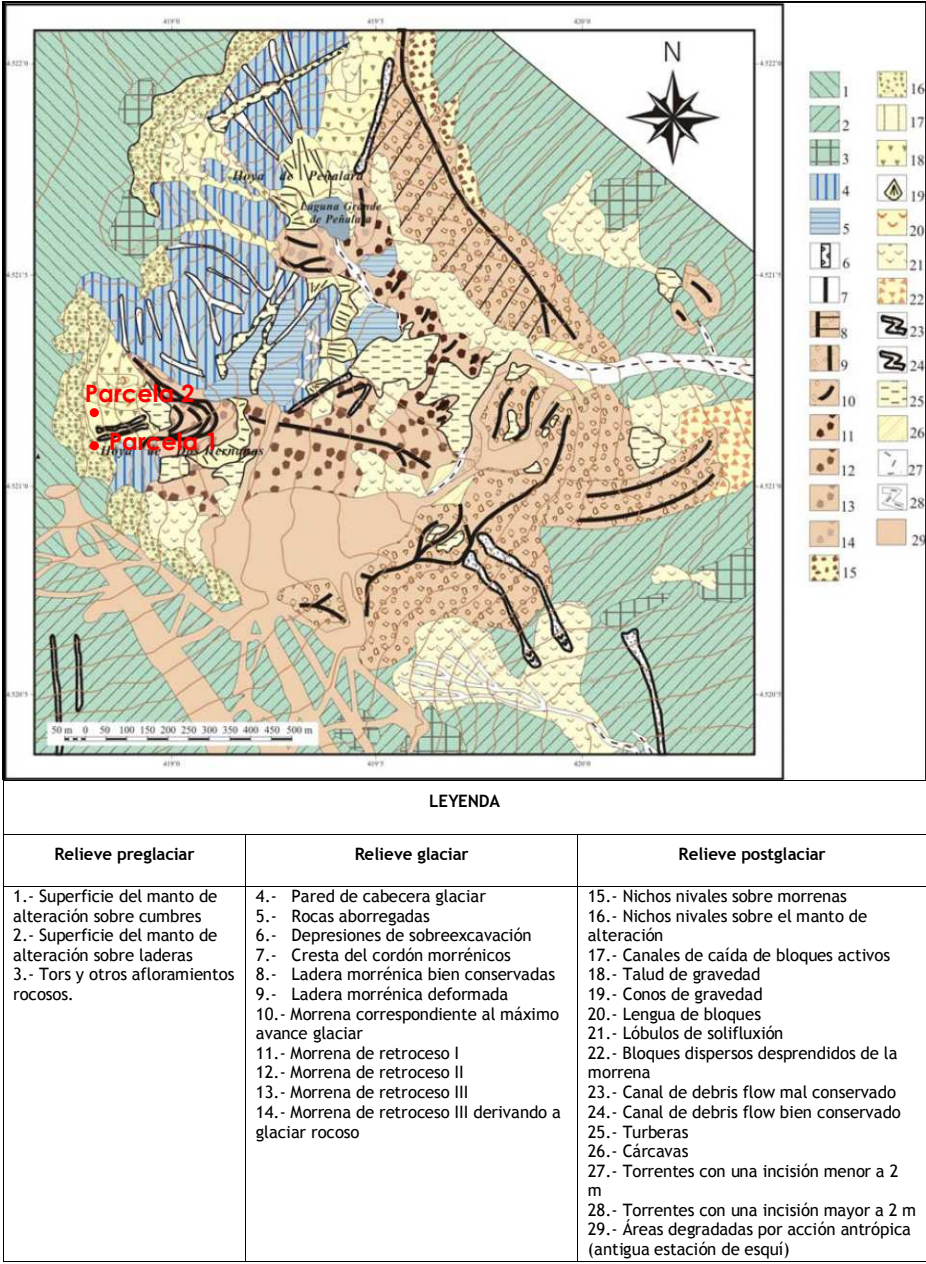


Figura 3: Mapa geomorfológico del área de estudio en el Circo de la Laguna de Peñalara (adaptado de Palacios *et al.*, 2003).

Las áreas preglaciares ocupan las laderas occidentales del Macizo (poco afectadas por la acción glaciár) y los sectores de las laderas orientales por debajo de los 1.800 metros, que corresponde, aproximadamente, a la altitud mínima que alcanzaron los glaciares.

En las laderas orientadas al oeste y noroeste se conserva todavía un manto de alteración preglaciár que alcanza los 4 ó 5 metros de espesor y que se caracteriza por presentar una marcada uniformidad morfológica (Palacios y Andrés, 2000). Al noroeste de la zona de cumbres se localiza un campo de bloques que aparecen ordenados en lóbulos alargados en el sentido de la pendiente y que alcanzan los 3 metros en su eje mayor. Las dimensiones de estos lóbulos son de decenas de metros y, en su interior, aparecen materiales más pequeños (cantos o bloques pequeños) y finos. Este campo de bloques es el resultado de la acción de procesos periglaciares sobre los materiales preglaciares y, en la actualidad, está siendo destruido por la acción nival en aquellos puntos en los que la acumulación de la nieve es mayor (Sanz, 1988).

Aunque la acción glaciár fue menos importante en estas vertientes occidentales, también se conservan ejemplos de algunos pequeños circos glaciares con varias formaciones morrénicas al noroeste de la cima de Peñalara (Alía Medina *et al.*, 1957).

En las áreas de la vertiente oriental del Macizo que por su limitada altitud, inferior a 1.800 metros, no se vieron afectadas por la acción glaciár persiste el manto de alteración de origen preglaciár con afloramientos rocosos en algunos puntos donde aparecen dispersos lóbulos de solifluxión, conjuntos de bloques desprendidos de las morrenas situadas justo por encima e incisiones generadas por la acción torrencial (Palacios *et al.*, 2003).

Los relieves glaciares aparecen básicamente en los sectores del Macizo situados en las vertientes orientales de éste que superan los 1.800 metros de altitud.

En el glaciár de Peñalara las morrenas frontales muestran un avance máximo de los hielos en el último periodo frío del Pleistoceno (*Würm*) (Franzle, 1959). Entre las morrenas generadas por este glaciár se distingue un arco correspondiente al máximo avance glaciár y tras él y a mayor altitud, otros pequeños arcos de reavance en el retroceso correspondientes a pequeñas pulsaciones del tardiglaciár (Sanz, 1988). Una de estas morrenas de retroceso hizo que el glaciár de Peñalara se dividiese en dos aparatos más pequeños, el de Dos Hermanas al sur y el de la Laguna al norte (Obermaier y Carandell, 1917).

A pesar de su proximidad, estos circos presentan algunas diferencias morfológicas. El circo de la Laguna se encuentra al norte. En él la masa de hielo fue más persistente, lo que hizo que su acción se prolongase. Como consecuencia, la altitud de su fondo es menor que la del circo de Dos Hermanas debido a que la sobreexcavación glaciár fue más prolongada (Obermaier y Carandell, 1917) y, además, se produjo una eliminación casi completa del manto de alteración por el hielo, de forma que la pared rocosa es claramente visible. La pendiente de esta pared es grande y existen en ella numerosos ejemplos de movimientos en masa (Palacios

y Andrés, 2000). En la actualidad, el fondo de este circo está ocupado por una laguna de origen glaciar.

En el circo de Dos Hermanas, situado al sur, el espesor del hielo fue menor y su comportamiento más fluctuante, con periodos muy estables y otros de rápidas regresiones, lo que dio lugar a la aparición de un mayor número de cordones morrénicos. El hielo no eliminó por completo el manto de alteración, por lo que existen amplias áreas en las que éste aparece, la pared rocosa tiene menor extensión, la ladera presenta menor pendiente que en el circo de La Laguna y los movimientos en masa son de dimensiones más reducidas (Sanz, 1988).

Los circos se encuentran cerrados en su base por varias líneas de morrenas más o menos deformadas y, en los casos en los que los arcos morrénicos presentan una dirección marcada del noroeste al sureste, constituyen barreras topográficas frenando y modificando la trayectoria de los vientos del oeste y del suroeste (Obermaier y Carandell, 1917).

En la parte inferior de los circos y entre los cordones morrénicos aparecen áreas de turberas y en la conexión de estos fondos con las morrenas, ejemplos de cárcavas (Palacios et al., 2003).

El borde superior de las paredes de ambos circos está retranqueado debido al desarrollo de terrazas nivales y pequeñas cubetas (Sanz, 1988), en una de las cuales se encuentran las parcelas de observación.

Las áreas glaciadas y las no glaciadas conectan en el área de cumbres, en las que se encuentran los picos Peñalara (2.428 metros), Dos Hermanas (2.284 y 2.269 metros) y Claveles (2.387 metros). En el área de cumbres aparecen depresiones de origen nival con profundidades variables pero que, en general, no superan el metro de profundidad y de unos metros de diámetro, cuyo fondo está cubierto por un manto de alteración en el que aparecen incrustados bloques de dimensiones decimétricas (Palacios y Andrés, 2000).

Los procesos morfogenéticos post glaciares en Peñalara están, a grandes rasgos, distribuidos por vertientes (Palacios y Andrés, 2000). Los agentes más importantes de modelado en la actualidad son una moderada acción periglacial, los movimientos en masa que se desarrollan en ambas laderas, la acción torrencial y los procesos ligados a la presencia de la nieve. La distribución espacial de estos procesos está condicionada por la disposición y la entidad de los materiales sueltos (manto de alteración y morrenas), por la pendiente y, en el caso de los procesos ligados a la nieve, a la distribución de ésta.

Los acción periglacial se centra en la gelifracción que afecta a las paredes rocosas de las vertientes orientales (Palacios y Andrés, 2000) y a algunos procesos de movilidad superficial (Sanz, 1986).

Los procesos de ladera son frecuentes y variados. En las laderas de los circos glaciares aparecen conos de gravedad en los afloramientos del manto de alteración con elevadas

pendientes (Circo de la Laguna) y lóbulos de solifluxión y lenguas de bloques en el circo de Dos Hermanas, en el que las pendientes son menores. En los restos de manto de alteración de las paredes glaciares aparecen también ejemplos de coladas de gelifluxión (si la pendiente es inferior a 20°) o de *debris flows* (con pendientes superiores a 20 ó 25°) (Obermaier y Carandell, 1917).

Las zonas de convergencia de varias morrenas también son áreas favorables para el desarrollo de procesos post glaciares, como se puede observar en los ejemplos de solifluxión o *debris flows* existentes (Palacios y Andrés, 2000).

En las áreas no glaciadas de la vertiente oriental también son numerosos los ejemplos de procesos de ladera como los lóbulos de solifluxión y los conjuntos de bloques desprendidos de las morrenas situadas justo por encima (Palacios *et al.*, 2003).

En las vertientes meridional y occidental en las que existe un manto de alteración bien desarrollado, los procesos más significativos en la actualidad son la existencia de *debris flows* jerarquizados en una red torrencial y de un nicho nival localizado en la cabecera del arroyo del Infierno, entre los picos de Peña Citores y Dos Hermanas (Palacios y Andrés, 2000).

La acción fluvial también afecta a las dos vertientes del macizo. En las laderas occidentales, los torrentes han incidido sus cauces en el manto de alteración alcanzando, en ocasiones, varios metros de profundidad extendiéndose y organizado y jerarquizando su red de drenaje sobre estas vertientes. En la vertiente oriental, también aparecen ejemplos de incisiones fluviales en las áreas no glaciadas mientras que en las que se vieron afectadas por los glaciares, con un manto de alteración más escaso, la acción torrencial también funciona como un agente de modelado retocando las zonas donde el manto de alteración no ha sido previamente eliminado, encajándose en los materiales de las morrenas y actuando como agente transportador de los materiales finos generados previamente (Palacios y Andrés, 2000).

Los procesos ligados a la acción nival son los que tienen una mayor relevancia en el área de estudio y los que, en muchos casos, suponen un paso previo para el desarrollo de otros procesos como los de ladera o los fluviales. En el Macizo, la nieve no presenta una distribución altitudinal, sino que tiende a acumularse en los mismos lugares en los que se instalaron las cabeceras de los glaciares pleistocenos, en las laderas orientales del Macizo por debajo del área de cumbres, protegidas de los vientos dominantes y en las que todavía está presente el manto de alteración. Las formas resultantes de la acción nival y sus características se describen en el apartado 2.4.

2.2. Aspectos climatológicos.

Como ya se indicó en la introducción, el estudio de las variables meteorológicas en áreas de montaña es un tema de interés creciente no sólo para conocer las características climatológicas propias de estos territorios, sino también para poder evaluar su influencia sobre las regiones limítrofes y comprender el papel que tienen en el sistema climático planetario. Además, en el contexto actual de los estudios de cambio climático, el estudio de la tendencia de las series climatológicas en entornos de montaña es particularmente importante (IPCC, 2008), ya que pequeñas variaciones pueden suponer grandes cambios en elementos tales como la disponibilidad de recursos hídricos, la distribución altitudinal de especies o las actividades económicas que se llevan a cabo en medios de montaña.

Las áreas de montaña se caracterizan por su fragilidad y su vulnerabilidad y frente a los cambios ambientales son unos de los espacios expuestos a un mayor riesgo, debido a que sus opciones de adaptabilidad son reducidas. En concreto, los cambios en las variables climatológicas tienen una respuesta mayor en las estaciones de montaña, lo que convierte a estos espacios en puntos de observación especialmente adecuados para determinar la evolución temporal de estas variables.

Las cadenas montañosas actúan como barreras topográficas frente a las perturbaciones meteorológicas modificando su trayectoria, su persistencia, la distribución de la nubosidad y dando lugar a una alteración del régimen de precipitaciones y de la ocurrencia de meteoros como las tormentas o las nieblas. Este comportamiento tiene como consecuencia el que los espacios de montaña presentan importantes diferencias climatológicas con las zonas llanas que las rodean; las temperaturas disminuyen con la altitud, las precipitaciones aumentan, la persistencia de la nubosidad y la aridez se modifican y el régimen de vientos cambia en su trayectoria e intensidad. En las áreas mediterráneas estas diferencias climatológicas entre zonas llanas y de montaña se ven acentuadas.

Todos estos hechos llevan a afirmar que la instalación de estaciones meteorológicas en zonas de montaña para la obtención de series de datos de distintas variables meteorológicas tiene gran interés para profundizar en el conocimiento de la climatología de estas áreas y de su evolución frente a modificaciones climáticas más generales.

El Sistema Central, como área de montaña en una zona mediterránea, presenta todas las características indicadas. La disposición de la cadena en la dirección este - oeste hace que suponga una barrera a las perturbaciones meteorológicas que llegan desde el noroeste provocando fuertes asimetrías climatológicas entre sus dos vertientes que, sobre todo, se acentúan en invierno, cuando dominan las situaciones meteorológicas del noroeste (Font, 1983). Estas diferencias espaciales están claramente presentes en el área de estudio definida en éste trabajo, lo que deja patente su representatividad respecto al Macizo de Peñalara, integrado, a su vez, en el Sistema Central.

A pesar de las dificultades que presenta la observación meteorológica en montaña, los estudios orientados a la caracterización climática de estos espacios son numerosos y variados en nuestro país. La Sierra de Guadarrama y el Macizo de Peñalara han sido objeto de estudio desde el punto de vista climatológico, además de por su interés científico, por el hecho de ser un espacio con interés turístico próximo a la ciudad de Madrid.

En la mayor parte de los casos, los estudios climatológicos del Macizo de Peñalara se encuentran integrados en otros más generales relacionados con la vegetación y su dinámica (Pintado y Sancho, 2005; Giménez-Benavides *et al.*, 2005), con su relación con los procesos geomorfológicos (Palacios y García, 1997a; Palacios y Andrés, 2000; Palacios *et al.*, 2003 y 2004; Marcos y Palacios, 2004; Muñoz y García, 2004), o con los estudios sobre el paisaje de la zona (Muñoz, 2000). En ocasiones se trata de estudios orientados a la caracterización local del área (Martínez *et al.*, 1984; Tena y Tinaud, 1986; Díaz y Bradley, 1997; Palacios y García, 1997a; Sanz Elorza *et al.*, 2003; Manrique y Fernández-Cancio, 2004; Lana *et al.*, 2006), aunque también existen otros que tienen como objetivo enmarcar los resultados como ejemplo de clima de alta montaña dentro de un contexto del clima global (Agustí-Panareda y Thompson, 2002; Kysely y Dubrovsky, 2005; Bosh *et al.*, 2007).

Las características fisiográficas de las zonas de montaña con multitud de grados de pendientes y orientaciones hace difícil realizar una descripción climatológica única. En un solo macizo como el de Peñalara se pueden describir distintos microclimas.

Para realizar una primera aproximación a las características climatológicas del área de estudio situada en el Macizo de Peñalara se han utilizado los datos del observatorio de Navacerrada que pertenece a la red de observatorios meteorológicos principales de la Agencia Estatal de Meteorología. La ubicación de este observatorio separado del Macizo de Peñalara alrededor de 8 kilómetros, la similitud de su entorno con el de Peñalara y la larga longitud de la serie de observaciones, hace que, a pesar de encontrarse a una altitud inferior, pueda considerarse adecuada para caracterizar climatológicamente, de forma cualitativa, la mayor parte de nuestra área de estudio. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la diferencia de altitudes y exposiciones de los dos sectores (Navacerrada y área de estudio en Peñalara) hace que sólo podamos “estimar” las características medias y no llevar a cabo una descripción exhaustiva. La instalación de una red de estaciones meteorológicas de alta densidad durante los últimos años en el Parque Natural de Peñalara permitirá en el futuro mejorar esta descripción y obtener resultados concluyentes sobre las distintas unidades climáticas que se pueden diferenciar en él.

El observatorio de Navacerrada (figura 4) se encuentra en una edificación situada en un collado en el Puerto de Navacerrada, en el paraje denominado Las Dos Castillas, donde se encuentra la divisoria de las cuencas del Duero y del Tajo. La localización geográfica de este observatorio es:

- Latitud: 40° 46' 50" N
- Longitud: 04° 00' 37" W
- Altitud: 1.890 metros

El jardín meteorológico se ubica en una loma próxima al observatorio (figura 5).

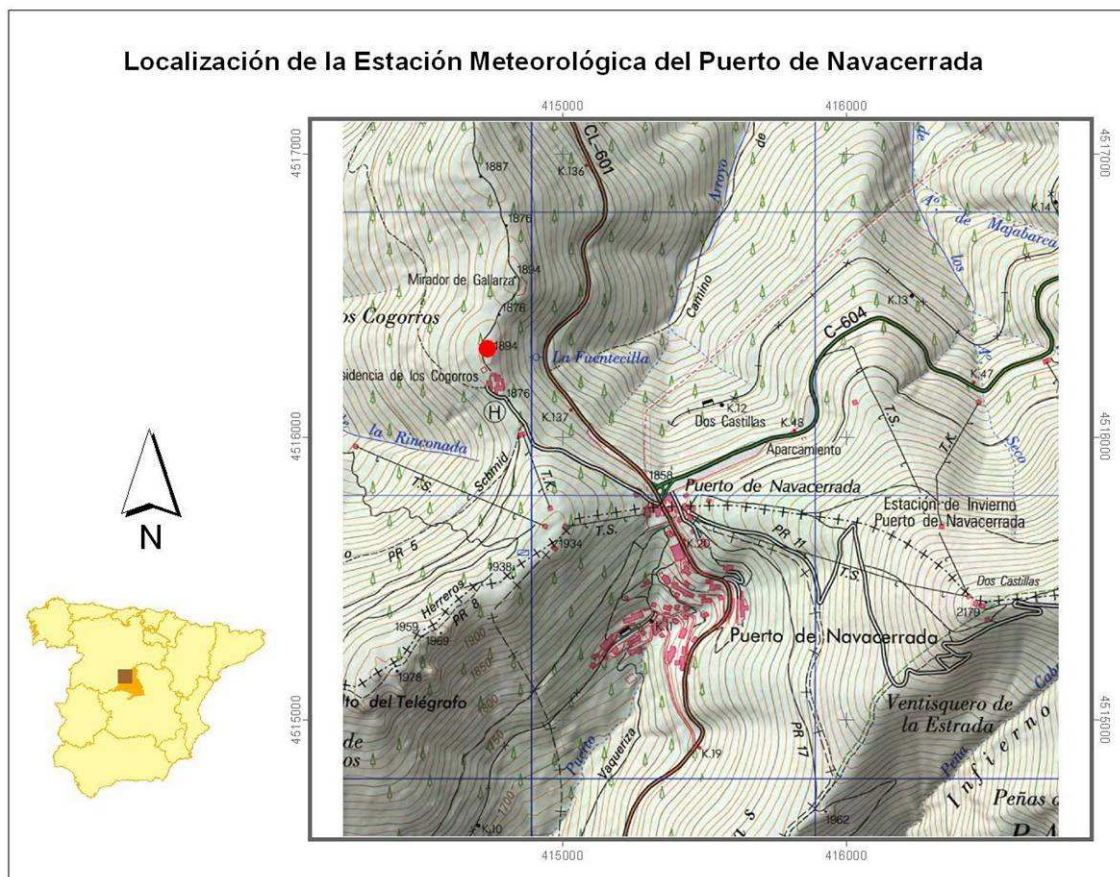


Figura 4: Localización de la estación meteorológica del Puerto de Navacerrada. Fuente AEMET.

Los primeros registros climatológicos que se conservan de este observatorio datan de 1946 y las series de temperatura y precipitación existentes no presentan lagunas significativas. Los registros de viento, temperaturas de suelo e insolación y radiación son posteriores.

Para realizar la caracterización climatológica se analizan las variables de temperatura, precipitación, ocurrencia de fenómenos como tormentas, nieblas, granizo y heladas, viento e insolación. Además, salvo que se indique lo contrario, se utilizan los datos registrados entre los años 1971 y 2000 que es el periodo de treinta años recomendado por la Organización Meteorológica Mundial y que, además, presentan una mayor homogeneidad en lo que se refiere a metodología de observación (WMO, 2011).



Figura 5: Ubicación del jardín meteorológico y equipos de medida del observatorio de Navacerrada. Fuente AEMET.

En las figuras 6 a 9 aparecen representadas la evolución del valor medio mensual de la temperatura (figura 6), la precipitación (figura 7), la insolación (figura 8) y el número de días de ocurrencia de distintos meteoros (precipitación, nieve, niebla, tormenta, granizo y helada) (figura 9).

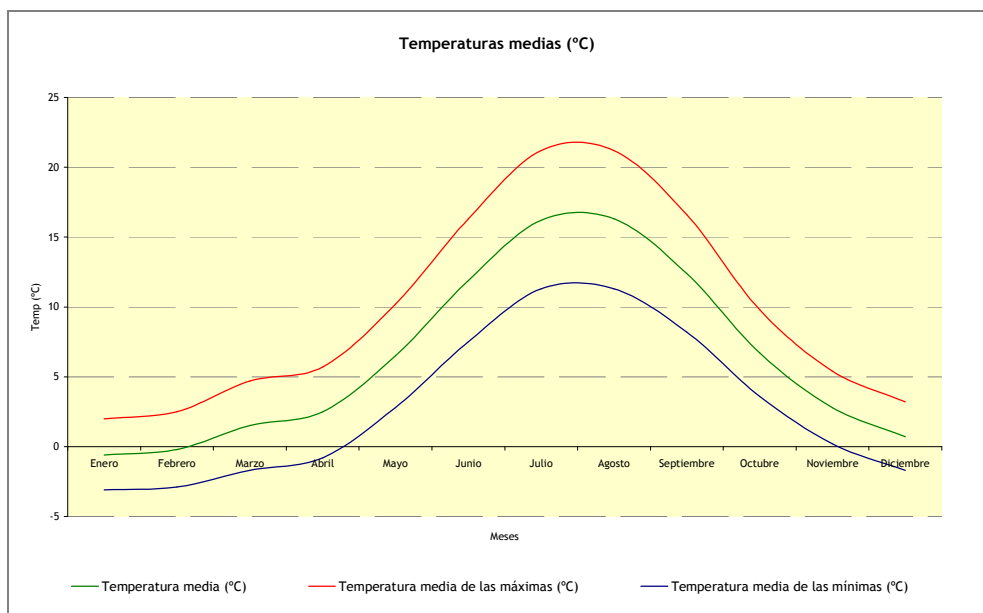


Figura 6: Representación de la evolución anual de la temperatura media y media de las máximas y media de las mínimas mensuales. Fuente: INM, 2002.

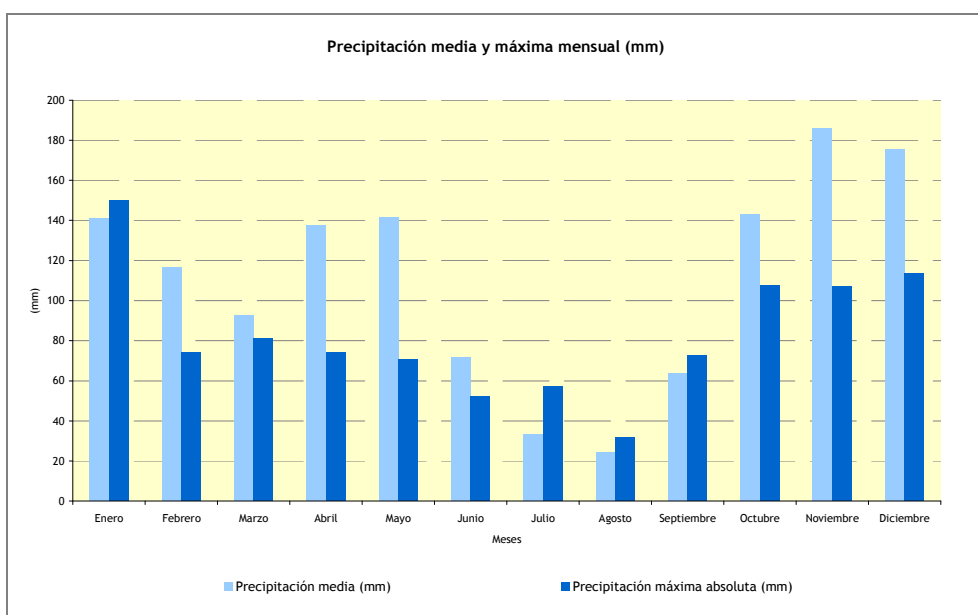


Figura 7: Representación de la evolución anual de la precipitación media y máxima mensual. Fuente: INM, 2002.

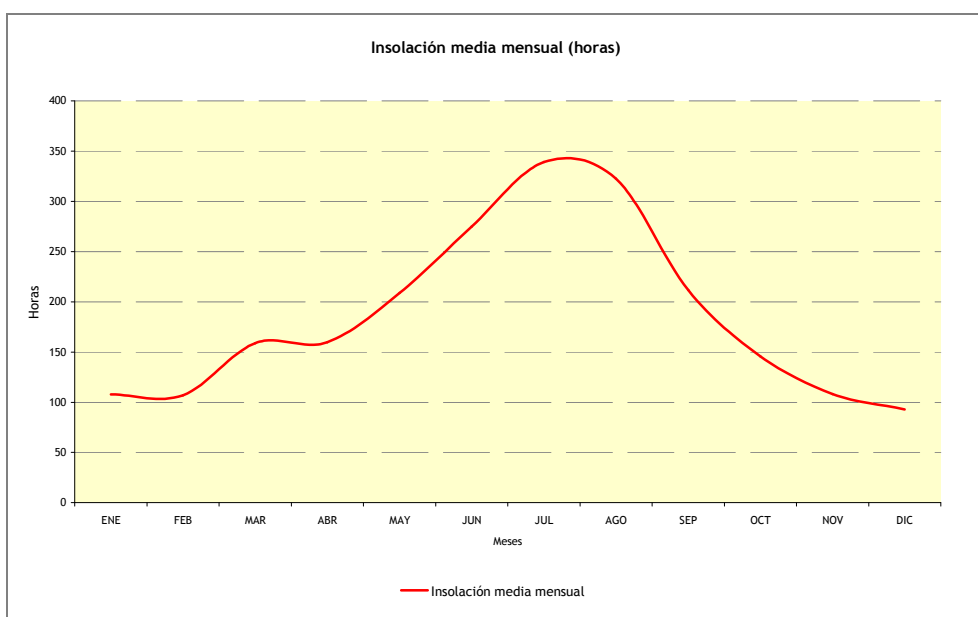


Figura 8: Representación de la evolución anual de la insolación media mensual. Fuente: INM, 2002.

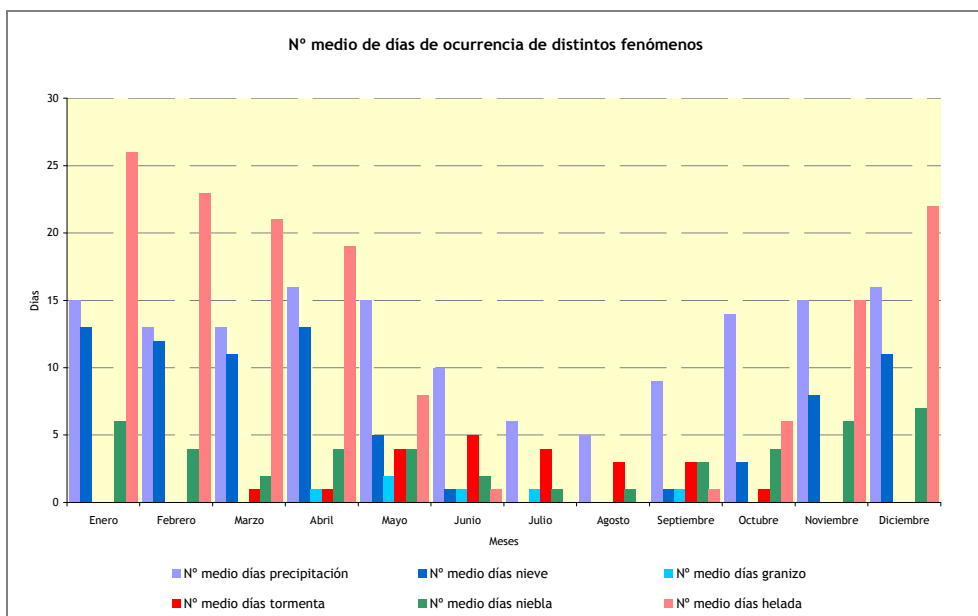


Figura 9: Representación de la evolución anual del número medio de días de ocurrencia de precipitación, nieve, niebla, tormenta, granizo y helada. Fuente: INM, 2002.

Los meses más calurosos son los de julio y agosto con temperaturas medias que no superan los 22°C. La temperatura media anual es de 6,4°C. El mes más frío es enero con una temperatura media de -0,6°C. Sólo los meses de enero y febrero presentan una temperatura media mensual negativa. En el periodo 1971/2000, la temperatura máxima absoluta registrada en la estación fue de 31,8°C el día 12/08/1987 y la mínima absoluta de -16,8°C el día 01/01/1971, sin embargo, existen registros anteriores que permiten asegurar que entre los años 1946 y 1971 se han observado temperaturas más bajas, en concreto, el día 25/12/1962 se alcanzaron -20,3°C.

Las temperaturas aumentan lentamente entre los meses de enero y abril y más rápido entre mayo y julio. Las temperaturas son similares en los meses de julio y agosto y, a partir de ese momento, comienzan a descender a un ritmo constante hasta el mes de noviembre, cuando el descenso se ralentiza hasta alcanzar sus valores mínimos en enero. Es importante resaltar que entre los meses de marzo y abril el crecimiento de las temperaturas medias es muy suave y, si comparamos este comportamiento con el de la insolación media mensual, vemos que esta variable presenta una evolución similar. Esto permite concluir que, evidentemente, ambas variables se encuentran estrechamente relacionadas.

Teniendo en cuenta que la temperatura del aire es función, entre otros factores, de la altitud se puede suponer que las temperaturas medias serán menores en el área de estudio, ya que se encuentra a una altitud superior a Navacerrada. Asimismo, se puede asumir que la evolución temporal de las temperaturas en Peñalara será similar a la de Navacerrada.

El mes con más precipitaciones es noviembre, con 185,7 mm y el más seco es agosto, con una media de 24,5 mm. La precipitación media anual es de 1325,7 mm. Sin embargo, estos

valores resultan poco significativos, si tenemos en cuenta la elevada variabilidad interanual del valor de la precipitación.

Las precipitaciones máximas diarias registradas también presentan una gran variabilidad tanto interanual como intra anual. El valor máximo se registró el 21 de enero de 1996 cuando se midieron 150 mm en un solo día, en su mayoría en forma de nieve.

Del análisis de las precipitaciones mensuales se concluye que el otoño es la estación en la que más precipitaciones se registran seguido del invierno, mientras que en verano son escasas y están generalmente asociadas a la ocurrencia de tormentas. Este hecho hace que en los meses de julio, agosto y septiembre sea frecuente que en un solo día se registre una precipitación superior a la precipitación media mensual correspondiente. Así, se puede observar en la figura 7, que la precipitación media mensual en los meses de julio, agosto y septiembre ha sido de 33,3, 24,5 y 63,3 mm respectivamente mientras que las precipitaciones máximas en un solo día en estos meses fueron de 57 mm, el 4 de julio de 1988, 31,7 mm el 9 de agosto de 1973 y 72,8 el 21 de septiembre de 1972.

Las precipitaciones invernales son debidas al paso de sistemas frontales que atraviesan la cordillera de oeste a este y, a menudo, se producen en forma de nieve. En el Macizo de Peñalara, las situaciones sinópticas con un flujo del noroeste son las que más precipitaciones dejan en las vertientes occidentales y las de flujo del suroeste, en la vertiente oriental.

En los meses de abril y, en menor medida mayo, se registra una intensificación de las precipitaciones, así como un aumento del número medio de días de precipitación. Este hecho es debido a que en primavera, el desplazamiento hacia el norte del frente polar provoca un mayor número de pasos frontales y, en consecuencia, un aumento del número de episodios de precipitación de forma que se intensifican las precipitaciones y los días de ocurrencia de éstas.

En verano, las mayores precipitaciones se producen asociadas a tormentas estivales que, en ocasiones se originan en áreas llanas de la Meseta, pero que se ven reforzadas al alcanzar los obstáculos orográficos.

En la figura 8 se representa la evolución de la insolación media mensual. El mes con mayor insolación media mensual es julio y el que presenta un valor menor es diciembre. Como media, se registran 2.237,6 horas de sol anuales.

Entre los meses de diciembre y febrero, la insolación media mensual crece ligeramente (95 horas en diciembre a 107 horas en febrero). Los meses de primavera, la evolución de la insolación presenta un comportamiento irregular. Como puede observarse en la figura 8, la insolación teórica aumenta de forma constante a lo largo de los meses de marzo, abril y mayo, mientras que la real crece entre los meses de febrero y marzo y entre los de abril y mayo presentando unos valores prácticamente iguales los meses de marzo y abril. Este comportamiento, al igual que ocurre con el de las precipitaciones y las temperaturas, es debido a que entre estos meses (marzo a mayo) se produce un ascenso en latitud del frente polar y, en consecuencia, la Península se ve afectada por un mayor número de frentes que provocan un aumento de la nubosidad. Entre las consecuencias que tiene esta disminución de

la insolación está la disminución del crecimiento de las temperaturas que se produce entre marzo y abril como se desprende de la comparación de las figuras 6 y 8.

La distribución temporal de la ocurrencia de los meteoros precipitación, nieve, granizo, tormenta, niebla y helada presenta también una gran variabilidad interanual, oscilando sus valores en un intervalo muy amplio de unos años a otros.

El número medio mensual de días de precipitación varía entre 5 (agosto) y 16 (diciembre). De media, al año se registra precipitación en este observatorio 147 días al año.

El número de días de precipitación presenta una estrecha similitud con el número de días de ocurrencia de nieve en los meses de enero, febrero y marzo, poniendo en evidencia el hecho de que, en estos meses, la mayor parte de las precipitaciones que se producen ocurren en forma de nieve. El número medio de días de nevada varía entre 13 en enero y abril y ausencia total de precipitaciones en forma de nieve en julio y agosto. En el periodo 1971/2000 no hay constancia de que se haya producido precipitación nivosa ningún mes de julio y agosto. Las precipitaciones en forma de nieve más importantes se producen los meses de enero, febrero marzo y abril. El número medio anual de días de nevada es de 78 días, prácticamente la mitad que el número medio anual de días de precipitación (147).

Las tormentas son fenómenos que se presentan entre los meses de marzo y octubre. El mes con mayor número medio de días con tormentas es junio (5 días).

La ocurrencia de granizo está muy relacionada con la de tormentas, ya que es un meteoro que está asociado a éstas. Las observaciones de granizo se producen entre los meses de abril y septiembre. El mayor valor de número medio de días de granizo se registra en mayo (2 días). A lo largo del año se registran, de media, 6 días con granizo.

Las nieblas son más frecuentes en invierno que en el resto de las estaciones y suelen estar asociadas a la ocurrencia de nevadas intensas y a la retención de la nubosidad por la cadena montañosa. El mes de diciembre es el que presenta, de media, más días de niebla (7 días) seguido de noviembre y enero (6 días) mientras que en los meses de julio y agosto sólo se produce este fenómeno 1 día del mes.

Como cabe esperar, las heladas se producen sobre todo los meses invernales. El número medio de días de helada es superior a 15 los meses de diciembre (22 días), enero (26 días), febrero (23), marzo (21) y abril (19). El resto de los meses el número de días de helada es inferior a 15. El número medio anual de días de helada es de 142.

El viento es la variable meteorológica que presenta mayores problemas de extrapolación en áreas de montaña, debido a la alta dependencia que presenta con el relieve. En general, el viento en montaña se acelera en los collados y en las cimas y disminuye de velocidad en las laderas de sotavento. La dirección del viento también se encuentra fuertemente influida por la topografía. Por lo tanto, la caracterización del viento en el Macizo de Peñalara a partir del que se registra en Navacerrada presenta fuertes limitaciones debido a las diferencias existentes entre la altitud del observatorio y del área de estudio (1.900 y 2.200 metros

respectivamente) y entre las características fisiográficas de ambas áreas (una loma venteada situada en las proximidades del puerto de Navacerrada en el primer caso y una ladera de origen glacial situada a sotavento de los vientos dominantes en el segundo).

La existencia de una serie de observación larga (desde 1946) permite analizar la evolución de algunas variables meteorológicas con el tiempo. En las figuras 10 a 15 se representan la precipitación total anual, la temperatura media, media de las máximas y media de las mínimas, el número de días de precipitación, el número de días con precipitación en forma de lluvia y en forma de nieve y el número de días en el que la nieve ha cubierto el suelo en el observatorio de Navacerrada entre los años 1961 y 2010. También se representan las tendencias del comportamiento de estas variables en ese periodo.

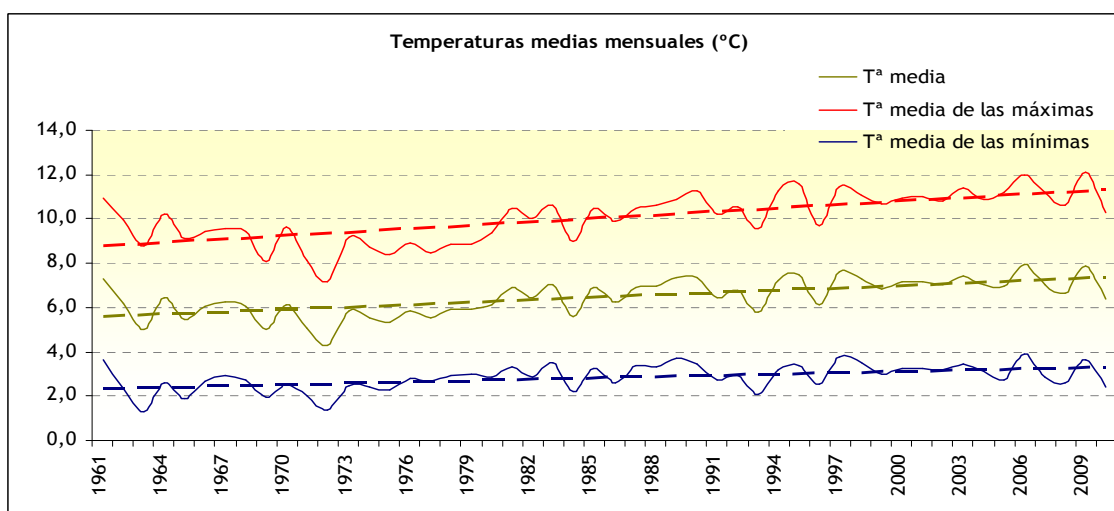


Figura 10: Evolución de distintas variables meteorológicas en el observatorio de Navacerrada. Periodo 1961 - 2010. Temperaturas medias mensuales y sus líneas de tendencia. Fuente: INM, 2002.

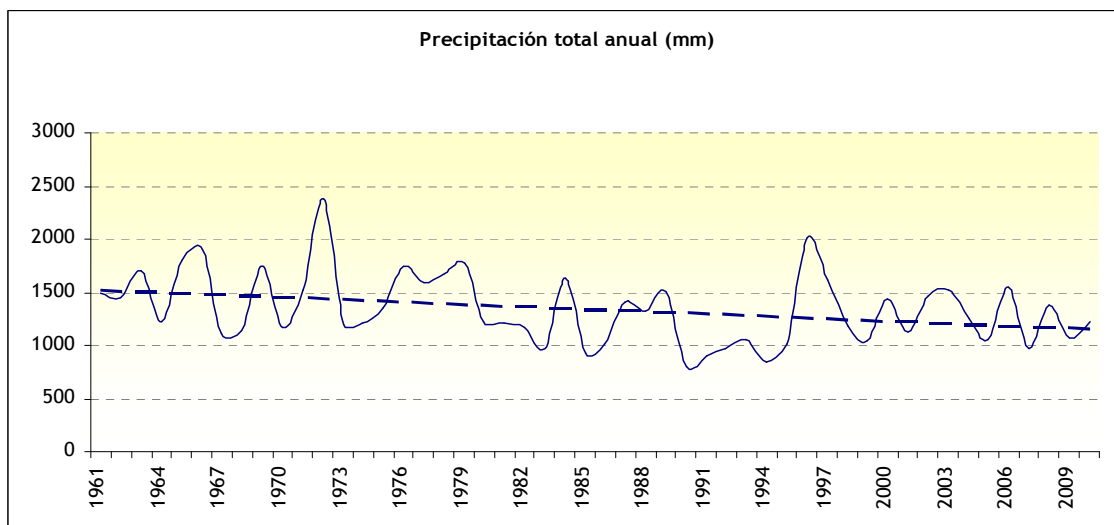


Figura 11: Evolución de distintas variables meteorológicas en el observatorio de Navacerrada. Periodo 1961 - 2010. Precipitación total anual y línea de tendencia. Fuente: INM, 2002.

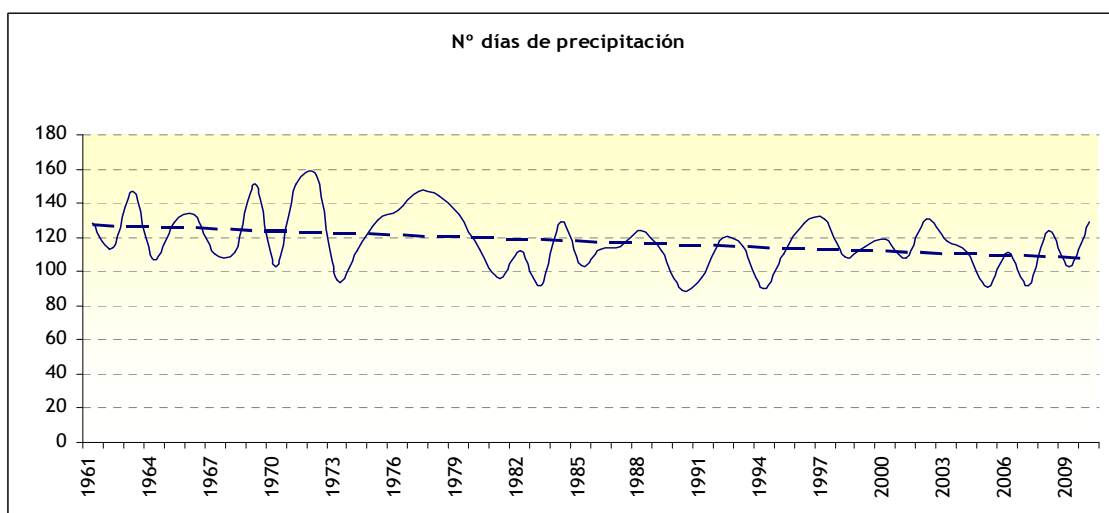


Figura 12: Evolución de distintas variables meteorológicas en el observatorio de Navacerrada. Periodo 1961 - 2010. Número de días de precipitación y línea de tendencia. Fuente: INM, 2002.

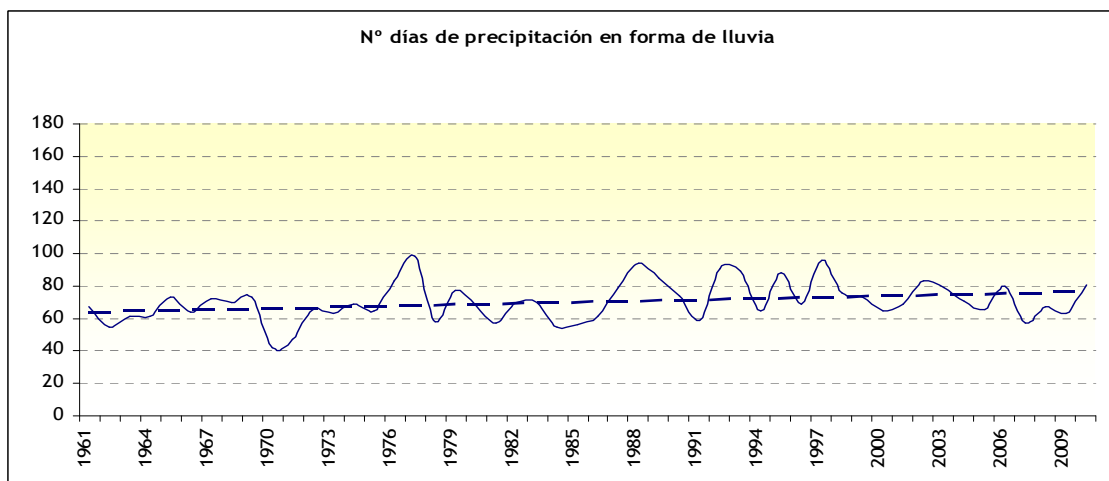


Figura 13: Evolución de distintas variables meteorológicas en el observatorio de Navacerrada. Periodo 1961 - 2010. Número de días con precipitación en forma de lluvia y línea de tendencia. Fuente: INM, 2002.

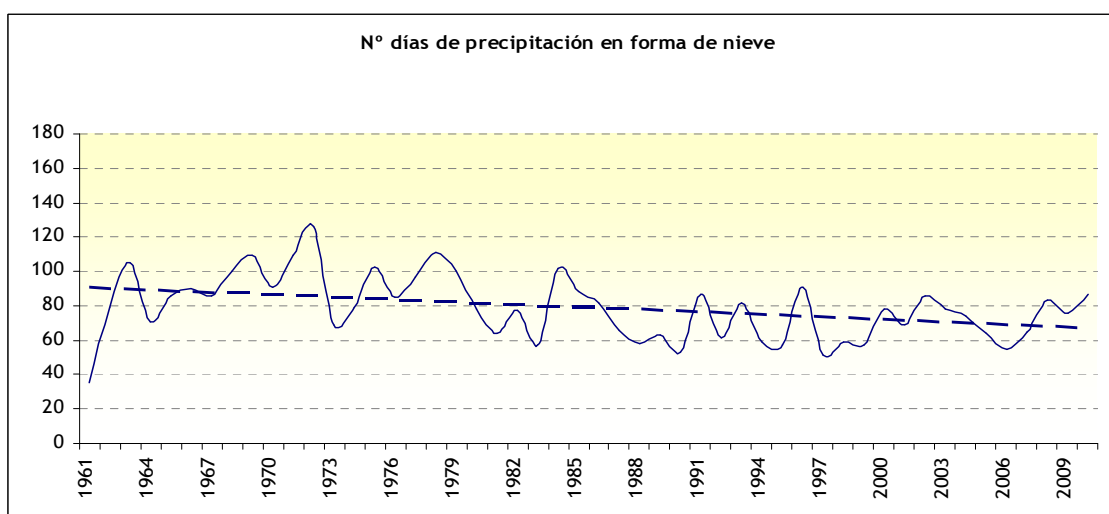


Figura 14: Evolución de distintas variables meteorológicas en el observatorio de Navacerrada. Periodo 1961 - 2010. Número de días con precipitación en forma de nieve y línea de tendencia. Fuente: INM, 2002.

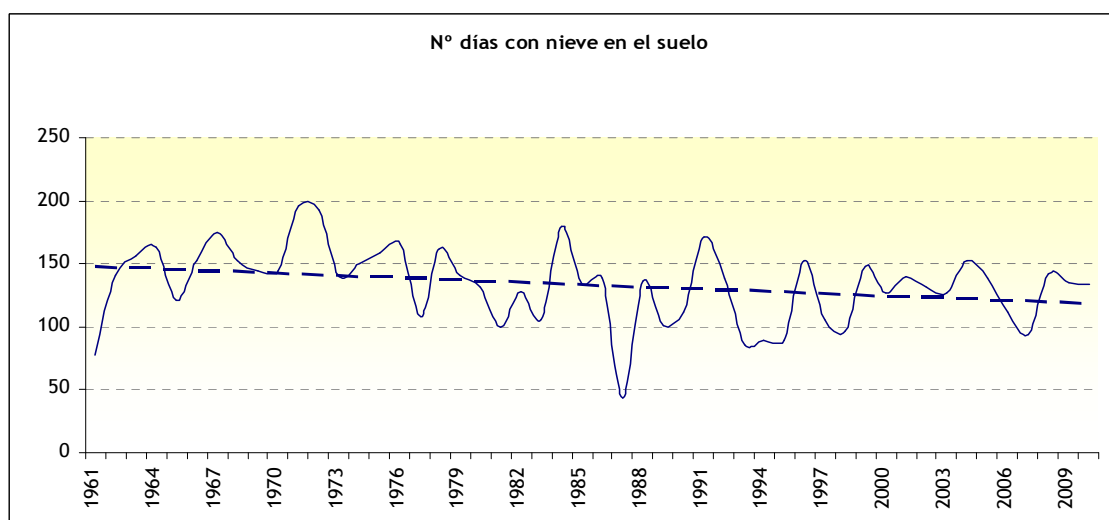


Figura 15: Evolución de distintas variables meteorológicas en el observatorio de Navacerrada. Periodo 1961 - 2010. Número de días con nieve en el suelo y línea de tendencia. Fuente: INM, 2002.

La variabilidad interanual de los parámetros meteorológicos es elevada. Sin embargo, sus tendencias de comportamiento son parecidas a las observadas en otros territorios de características similares. En el caso de la precipitación total anual (figura 11), se aprecia un descenso con el tiempo de la precipitación total anual, mientras que la temperatura media y media de las extremas (figura 10) han experimentado en los últimos 40 años una tendencia a incrementarse. El número de días de precipitación (figura 12), también muestra un ligero descenso entre los años 1961 y 2010, aunque si se representa por separado los días en los que la precipitación es en forma de lluvia (figura 13) y los que es en forma de nieve (figura 14), se observa que, si bien parece haber menos días de precipitación, esto es debido a un descenso del número de días en los que ésta es en forma de nieve. Lógicamente, este descenso del número de días de nevada y el aumento de las temperaturas hace que el número de días con nieve en el suelo (figura 15) también haya descendido en el periodo 1961 - 2010. En este sentido es importante señalar que el aumento de las temperaturas y el descenso en el número de días con nieve en el suelo y con precipitación en forma de nieve no son constantes a lo largo del año, sino que es más acusado en primavera que en el resto de las estaciones.

En la figura 16 se representan la temperatura media, el número de días con precipitación en forma de nieve y el número de días con nieve en el suelo para las estaciones de otoño, invierno y primavera.

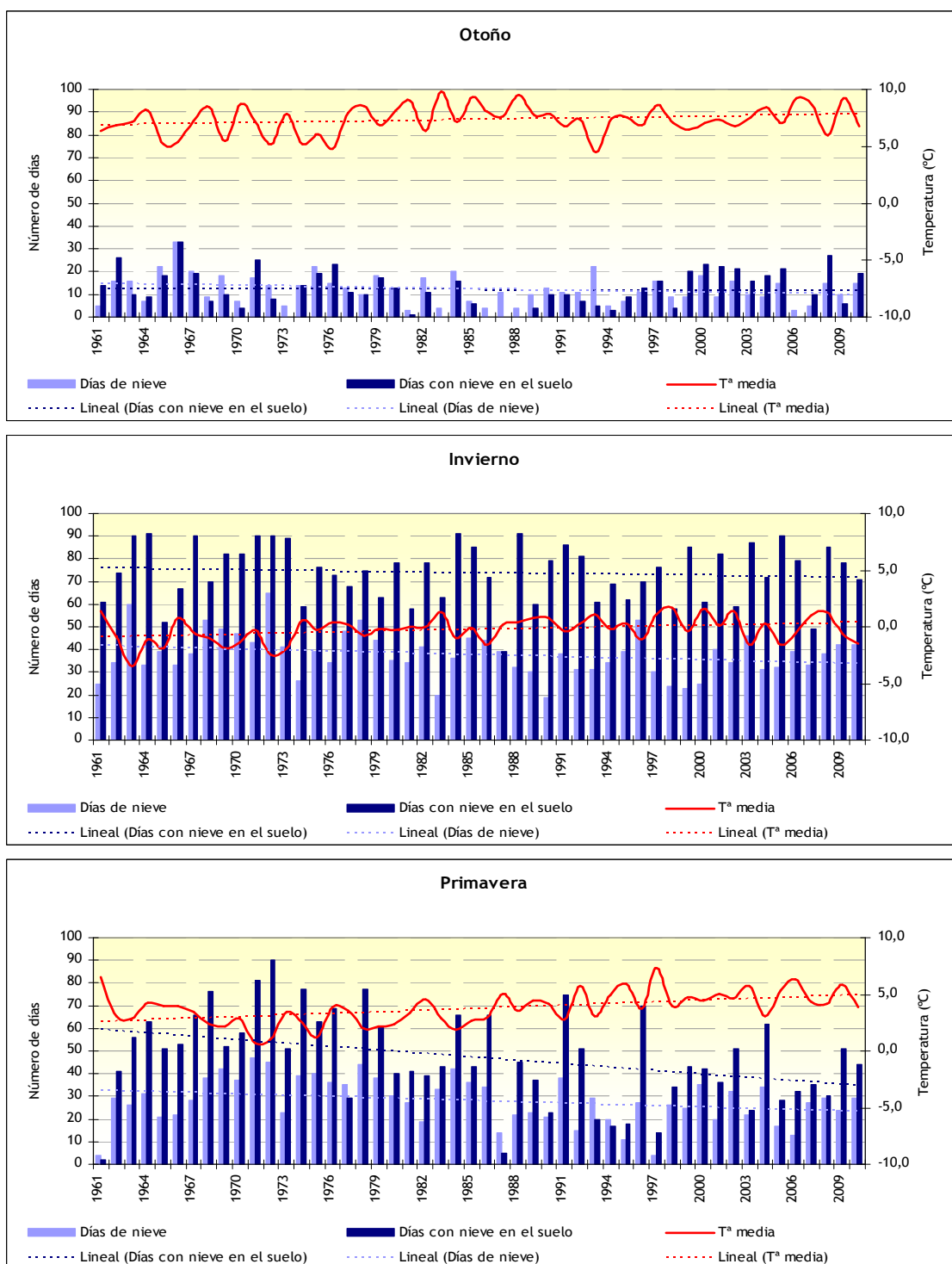


Figura 16: Evolución, por estaciones, de la temperatura media, el número de días con nieve en el suelo y el número de días con precipitación en forma de nieve y de sus líneas de tendencias en el observatorio de Navacerrada. Periodo 1961 - 2010. Fuente: INM, 2002.

Los valores máximos de días de precipitación en forma de nieve y de días con nieve en el suelo se producen en invierno y, de forma secundaria, en primavera. En otoño estos valores son pequeños, ya que, normalmente, la temporada de nieve no comienza hasta bien entrada la estación.

Como puede observarse, a lo largo del periodo 1961 - 2010, el aumento de temperatura media y el descenso de días con nieve en el suelo y de días con precipitación en forma de

nieve es más acusado en primavera que en otoño e invierno, lo que hace suponer que, al disminuir el número de días con nieve en el suelo en primavera, el manto de nieve cada vez es menos persistente y su fusión tiene lugar cada vez en momentos más tempranos de la temporada. Así, en el periodo 1961 - 2010, en primavera se ha producido un incremento medio en la temperatura de 0,48°C cada 10 años mientras que en invierno y en otoño ha sido de 0,25 y 0,20°C cada 10 años respectivamente. La disminución de días con precipitación en forma de nieve en primavera ha sido de 1,9 días cada 10 años, en otoño de 1 día cada 10 años y en invierno de 1,7 días cada 10 años. La diferencia estacional más significativa se ha registrado en el número de días con nieve en el suelo que en primavera ha disminuido en 5 días cada 10 años, en otoño 0,13 días cada 10 años y en invierno 0,82 días cada 10 años. Todos estos resultados son similares a los observados en otras zonas de montaña mediterránea y corroboran las estimaciones realizadas a partir de los distintos escenarios de cambio climático global (IPCC, 2008).

2.3. Aspectos biogeográficos.

En una primera aproximación, la vegetación en áreas de montaña se organiza en una serie de pisos. Esta distribución teórica se ve a menudo modificada por otros factores de índole topográfico, edáfico, geomorfológico o climático. Este hecho hace que el estudio de la vegetación de estas áreas, su distribución espacial y temporal, su composición florística y su dinamismo sean un frecuente objeto de investigaciones orientadas a la descripción de los espacios de montaña, tanto desde el punto de vista teórico, como práctico.

La situación del Macizo de Peñalara en el centro de la Península Ibérica y formando parte del Sistema Central, su proximidad a zonas intensamente habitadas y sus características fisiográficas ha hecho que hayan proliferado los estudios centrados en la vegetación de este espacio a lo largo del siglo XX. Un primer tipo de estudios se ocupan de la descripción de la vegetación del Macizo y de su composición florística, así como su clasificación fitosociológica (Rivas - Martínez, 1963 y 1982; Sanz, 1979 y 1988; Fernández-González, 1988, 1991 y 1999; Rivas - Martínez *et al.*, 1990 y 1999). Estos trabajos están íntimamente relacionados con otros orientados a investigar la distribución espacial y temporal de las especies vegetales en el Macizo (Luceño y Vargas, 1991; Gavilán *et al.*, 1998; Muñoz y García, 2004).

La relación entre la vegetación y otros elementos geoecológicos es también objeto de estudio que cobra cada vez más interés. En concreto, las relaciones analizadas de forma más exhaustiva son las de la actividad geomorfológica y la extensión y cubierta del manto nivoso con el tipo y cobertura de la vegetación. El estudio de esta relación permite, por ejemplo, conocer el grado de actividad de los procesos geomorfológicos vigentes en la actualidad. Este es el objetivo las investigaciones de Palacios y García (1997b), Andrés y Palacios (2004), Muñoz y García (2004), Palacios *et al.*, (2003 y 2004).

Estas investigaciones pueden tener un objetivo meramente teórico pero, frecuentemente, suponen un primer paso en otros estudios con fines prácticos como el estudio, descripción y diferenciación de unidades de paisajes de la montaña madrileña (Sanz, 1979 y 1988; Bullón, 1988) o el establecimiento de medidas y legislación para la protección y conservación del Macizo de Peñalara (Izquierdo, 2005).

Finalmente, en el contexto actual de cambio climático el conocimiento cualitativo y cuantitativo de la dinámica de la vegetación en áreas tan frágiles como las de la montaña templada de clima mediterráneo puede servir como indicador de sus consecuencias en estos territorios. El establecimiento de estos indicadores en diversos sectores del Sistema Central entre los que se encuentra el Macizo de Peñalara ha sido el objeto de estudios diversos (Muñoz y García, 2004 y 2009; Pintado y Sancho, 2005; Giménez-Benavides *et al.*, 2005; Muñoz *et al.*, 2007; Andrés *et al.*, 2007; García *et al.*, 2009; García y Muñoz, 2010).

Siguiendo criterios biogeográficos, el Macizo de Peñalara se encuentra clasificado en la subregión Mediterránea occidental dentro de la provincia Carpetano - Ibérico - Leonesa, subprovincia Carpetana, Sector Guadarrámico, subsector Guadarramense, distrito Paularense.

En función de la altitud se pueden distinguir dos cinturones de vegetación, el Oromediterráneo, entre 1.800 y 2.150 metros, y el Criomediterráneo, por encima de los 2.150 metros (Rivas Martínez, 1963).

En términos generales, la vegetación típica del Macizo de Peñalara está constituida por bosques de *Pinus sylvestris* en las cotas más bajas y por matorrales de *Juniperus communis*, *Adenocarpus hispanicus* y *Cytisus oromediterraneus* en las superiores. Sin embargo, las asimetrías este - oeste que presenta el Macizo en sus características geomorfológicas, topográficas, nivológicas y meteorológicas tienen como consecuencia una distribución muy heterogénea de la vegetación, tanto en los aspectos relacionados con el porcentaje de cobertura vegetal, como en el de la variedad de especies, portes y morfologías.

Los factores geomorfológicos influyen en la distribución espacial de la vegetación. Las zonas con menor actividad geomorfológica favorecen la instalación de la vegetación y, por tanto, suelen presentar una mayor cobertura vegetal.

La topografía también condiciona el tipo de vegetación. Las zonas con topografías llanas o con poca pendiente son más proclives a tener un suelo que permita el crecimiento de vegetación y a mantener la humedad y el drenaje necesario para que ésta se mantenga, por lo tanto, estas topografías presentan una mayor cobertura vegetal que aquellas con pendiente más abrupta.

La nieve es un factor que, en el Macizo de Peñalara, es decisivo en la distribución tanto espacial como temporal de la vegetación por varios motivos. En primer lugar, las zonas en las que la nieve cubre el suelo las especies que crecen son aquellas cuyo ciclo vegetativo es inferior al periodo libre de nieve, de forma que el tipo de vegetación se ve limitado. Además, la nieve tiene importantes consecuencias en las características del sustrato sobre el que la vegetación se instala. En general, las zonas con mayor innivación presentan también mayor intensidad en los procesos erosivos de forma que el suelo es más escaso y frágil y la cobertura vegetal es menor. En la sierra de Guadarrama existe una amplia bibliografía dedicada al estudio de todos estos procesos (Palacios y García, 1997b; Palacios *et al.*, 2003; Muñoz y García, 2004; Andrés *et al.*, 2007 y García *et al.*, 2009, entre otros).

La última consecuencia que tiene la existencia de nieve está relacionada con la humedad que aporta al suelo. La fusión del manto de nieve aumenta el contenido en humedad del suelo y la disponibilidad de agua por parte de la vegetación. Además este aporte se lleva a cabo lentamente, lo que hace que la humedad del suelo no varíe de forma brusca y que sea mejor aprovechada por la vegetación. En particular, la combinación de un manto de nieve con una topografía más o menos llana y un suelo bien drenado es especialmente adecuada para el crecimiento vegetal.

Como ya se ha comentado, la presencia de un manto de nieve suficientemente espeso aísla térmicamente el suelo y proporciona humedad a éste. Así, existen especies, denominadas

quionófilas, que se aprovechan de la protección y la humedad que la nieve proporciona, evitando los suelos helados y las temperaturas extremas (Billings y Bliss, 1959).

Los factores meteorológicos son también limitantes en el desarrollo de la vegetación y en sus características; además de la distribución de las precipitaciones y temperaturas, otras variables como el viento, la radiación o la existencia de nieve también lo condicionan.

La modificación que produce la topografía en la dirección y la fuerza del viento y la aceleración del viento en los collados y en las cimas del Macizo y en las crestas de las morrenas provocan una alteración en la distribución altitudinal de la vegetación y, sobre todo, en el porte y la morfología de ésta, de forma que, en estas áreas, son frecuentes los ejemplares que adoptan formas redondeadas y que limitan su crecimiento con el fin de minimizar su resistencia al viento.

La desigual distribución de la radiación, debido a la existencia de una topografía accidentada es otro de los condicionantes meteorológicos que causa una distribución desigual de la vegetación. En las áreas en las que la radiación solar apenas llega, como las grietas que se forman en las laderas de la vertiente oriental, aparecen especies que se adaptan a estas condiciones.

La consecuencia de la combinación de estos factores es una distribución de la vegetación que no se limita a un conjunto de bandas altitudinales, sino que sigue un patrón mucho más complicado apareciendo como un mosaico.

El área de estudio se encuentra situada en los sectores más elevados del macizo, superando el límite forestal, de forma que en ella no son frecuentes los ejemplares de porte arbóreo. En las vertientes orientadas al sur este límite está situado en torno a los 2.100 metros, mientras que en las vertientes orientales del Macizo se encuentra alrededor de los 1.800 metros, por debajo de las áreas glaciadas (Obermaier y Carandell, 1917).

En las áreas glaciadas del macizo, la diversidad morfológica tiene como consecuencia una mayor complejidad en lo que se refiere a la distribución de la vegetación tanto en cantidad, como en variedad. En el momento de máxima extensión de los glaciares sus frentes se situaron a unos 1.800 metros de altitud, por encima del actual límite forestal (Obermaier y Carandell, 1917), por lo tanto, la vegetación existente en la actualidad en los circos glaciares de Dos Hermanas y la Laguna es mayoritariamente de porte arbustivo o subarbustivo, y existen sólo ejemplares de portes mayores de forma dispersa. El tipo y cobertura de la vegetación que aparece en los circos glaciares varía en función de la topografía, la actividad geomorfológica, la humedad del suelo y la persistencia de la nieve.

En los límites superiores, por encima de los 2.200 metros, y en las paredes de los circos, la cobertura vegetal es escasa, las especies dominantes son *Festuca aragonensis* y *Phyteuma hemisphaericum* dependiendo de la humedad. Las zonas rocosas inferiores también presentan

una escasa cobertura y la composición florística esta condicionada por la existencia de una mayor o menor cantidad de matriz arenosa. Las especies más frecuentes son *Linaria saxatilis* y *Dryopteris oreades*. En estas paredes existen, con frecuencia, canales incididos en los que la radiación es escasa y la persistencia de la nieve elevada y en ellos la especie dominante es *Gentiana lutea*. Otra morfología presente en las paredes glaciares son las repisas con suelos arenosos y húmedos en las que la especie más común es el endemismo *Allium schoenoprasum* subsp. *latiorifolium*. En las paredes rocosas también aparecen distintas especies de líquenes como *Umbicularia pustulata* y *Aspicilia cinererea* en las áreas más elevadas con menor persistencia de la nieve y *Rhizocarpon geographicum*, *Rhizocarpon microsporum* y *Umbicularia deusta*, donde la nieve se mantiene más de 120 días al año (Palacios y García, 1997b).

Los nichos nivales situados en las cabeceras de los circos glaciares tienen también una vegetación determinada condicionada por la distribución y persistencia de la nieve y por las características geomorfológicas. En general, la vegetación que aparece en estos ámbitos está adaptada a la persistencia nival y su distribución espacial suele ser en orlas concéntricas, decreciendo la cobertura vegetal de las orlas externas a las más internas. En la zona central del nicho, aquella en la que la nieve es más persistente y la actividad geomorfológica más intensa la cobertura vegetal no supera el 20% y *Mucizonia sedoides* es la única especie que aparece en los puntos donde la nieve perdura más de 220 días al año (Palacios *et al.*, 2003).

En los fondos de los circos glaciares de la Laguna y Dos Hermanas la vegetación dominante son los pastos. Los pastos secos aparecen en las laderas de fuerte pendiente en las que la nieve no se acumula. En la composición florística de estos pastos domina *Festuca aragonensis*, aunque también aparecen varios endemismos. Los pastos húmedos son más frecuentes en el fondo de las cubetas glaciares, en suelos con poca pendiente y escaso drenaje. La especie dominante en estos espacios es *Nardus stricta*, acompañada por *Campanula herminii* y *Agrostis castellana* (Palacios y García, 1997b).

Las morrenas que limitan los circos de por el sur y por el este presentan una composición florística muy distinta en cada ladera, condicionada por la cantidad de nieve que acumulan y su exposición a los vientos dominantes. En las laderas de las morrenas más expuestas a los vientos la acumulación de nieve es menor y predomina la presencia de una combinación de *Cytisus oromediterraneus*, *Juniperus communis* y *Adenocarpus hispanicus*. En las crestas de las morrenas predomina *Cytisus oromediterraneus*, que es la especie que mejor soporta los vientos fuertes. Las vertientes de las morrenas situadas a sotavento presentan más acumulación de nieve. La vegetación más frecuente en estas vertientes está constituida por *Juniperus communis*. En la vertiente oriental de la ladera izquierda del circo de la Laguna aparece un nicho nival que presenta una vegetación propia de estos espacios (Palacios y García, 1997b).

En el extremo oriental de los circos de la Laguna y Dos Hermanas existe un curso torrencial en las proximidades del cual se desarrolla un tipo de vegetación de ribera adaptada a las altitudes elevadas, superiores a 1.900 metros. Esta vegetación es de tipo arbustivo y subarbustivo, se dispone espacialmente de forma lineal en las proximidades del cauce y está integrada por especies como *Myosotis stolonifera*, *Viola palustres* o *Stellaria alsine* entre otras (Palacios y García, 1997b).

Rodeando las áreas glaciadas del Macizo aparecen las que no se vieron afectadas por la acción glaciaria. En la vertiente oeste del Macizo las formaciones vegetales dominantes son las masas de matorral de *Cytisus oromediterraneus* en las zonas más venteadas (crestas y collados), *Adenocarpus hispanicus* en las pendientes más suaves y *Juniperus communis* en las áreas pedregosas, acompañada por ejemplares aislados de *Pinus sylvestris* muy deformados por el viento y la nieve (Palacios y García, 1997b). A partir de los 2.000 metros aparece un piornal abierto en el que domina *Adenocarpus hispanicus* y por encima, en las áreas de cumbres, surge un pastizal psicoxerófilo en el que domina *Festuca indigesta* acompañada de otras especies de las asociaciones *Hieracio castellani* - *Festucetum curvifoliae* y *Hieracio myriadeni*-*Festucetum curvifoliae*. A mayores altitudes, ya en la zona de cumbres, dominan formaciones rupícolas y de pedreras (Palacios y García, 1997b).

En las áreas que presentan altitudes inferiores a 1.900 metros aparece vegetación arbórea, generalmente compuesta por ejemplares de *Pinus sylvestris* que aparece acompañado con un sotobosque en el que domina el matorral de enebro (*Juniperus communis*). El espesor de este bosque de pinos aumenta conforme disminuye la altitud (Palacios y García, 1997b).

Una de las principales características de la vegetación del área de estudio es su dinamismo, vinculado a las variaciones en las otras variables geoecológicas (climáticas, nivológicas y geomorfológicas). Las relevantes consecuencias que resultan de las variaciones temporales de estas variables y en sus relaciones merecen ser objeto de un apartado propio.

2.4. Dinámica geoecológica en los nichos nivales.

Entre los procesos más relevantes en la configuración del relieve del Macizo de Peñalara destacan todos aquellos ligados a la acción nival. Se utiliza el término nivación para definir al conjunto de procesos que tienen lugar en los neveros o en las áreas en las que es alta la persistencia nival y que provocan una sobre excavación del terreno (Hobbs, 1910). Las formas derivadas de estos procesos se denominan nichos de nivación.

Entre las características más relevantes de los nichos de nivación del área de estudio destaca una intensa actividad erosiva, la permanencia de la nieve durante más de 180 días al año (más de 200 días en las áreas más activas) y una cobertura vegetal y una composición florística adaptada a la elevada persistencia de la nieve (Palacios *et al.*, 2004). Todas estas condiciones hacen que los nichos de nivación presenten un elevado dinamismo.

La formación y evolución de los nichos de nivación se ve favorecida por la existencia de laderas con un manto de alteración profundo y por la presencia de nieve que favorece el aporte de agua líquida. En las laderas de pendiente regular y con un manto de alteración bien evolucionado, como son las vertientes occidentales de Peñalara, la acumulación de nieve es escasa, sin embargo, si esta regularidad de la ladera se rompe por el desencadenamiento de deslizamientos y otros procesos de ladera, se pueden generar irregularidades en la pendiente, dando lugar a la aparición de un canal en el que se favorece la acumulación y la persistencia de la nieve (Palacios *et al.*, 2004). Se genera entonces en la ladera un nicho en forma de canal. La presencia de nieve en este canal limita la instalación de la vegetación, lo que da lugar a un aumento de la inestabilidad de sus laderas que tienden a retroceder, aumentando así la anchura del canal. A partir de una determinada anchura del canal la acumulación de la nieve es asimétrica (figura 17) de forma que en una de las laderas, la que se encuentra a sotavento de los vientos dominantes, la acumulación de la nieve es mayor que en la de barlovento, y en ésta última la nieve no se acumula, la vegetación se densifica y la ladera se estabiliza.



Figura 17: Ejemplos de acumulación asimétrica de la nieve en las cumbres de Guadarrama. Febrero 2012.

A partir de ese momento el canal crece de forma asimétrica (figura 17) y se ensancha por el retroceso de una de sus laderas convirtiéndose en un nicho con morfología de hoyo. Estos hoyos se caracterizan por presentar una pared transversal a la pendiente y un rellano en su base, y por ser zonas en las que se favorece la acumulación de la nieve. En la parte frontal del rellano se forman coladas de solifluxión, favorecidas por el aporte de las aguas pronivales, en las que se movilizan los materiales del manto de alteración. La unión lateral de varios nichos en forma de hoyos da lugar a la aparición de un nicho en forma de “ceja” o terraza de nivoplanación. La existencia de varios canales próximos entre sí puede hacer que el proceso se repita dando lugar a la aparición de varios nichos en forma de “ceja” yuxtapuestos (Palacios *et al.*, 2004).

Toda esta evolución se ve favorecida por la existencia de condiciones meteorológicas determinadas (oscilaciones térmicas elevadas, marcadas diferencias de temperatura entre invierno y verano, aridez importante que limita el crecimiento de la vegetación) que concurren en las áreas de montaña de clima mediterráneo.

Los factores necesarios para la formación de estos nichos son, además de la presencia de nieve, la existencia de materiales poco estabilizados (manto de alteración, materiales finos y poco estables de las morrenas) y poca presencia de vegetación, de forma que la acción de la nieve sea más efectiva. En el Macizo de Peñalara, la distribución espacial de la nieve no está sólo condicionada por la altitud, sino que depende de otros factores meteorológicos, fundamentalmente del régimen de vientos y de la distribución de las precipitaciones. Así, la nieve se acumula en las caras de sotavento de los principales obstáculos (morrenas y resaltes rocosos) (Palacios y Andrés, 2000).

Los ejemplos más claros de nichos nivales aparecen en las vertientes este del Macizo por debajo de las zonas de cumbres, en las que también tuvo lugar la acumulación glaciaria, y que constituyen la ladera de sotavento de los vientos dominantes. En estas vertientes la acción nival afecta, sobre todo, a aquellas áreas en las que el manto de alteración no ha sido completamente eliminado por los glaciares de forma que, en el borde superior de ambos circos aparecen diversos ejemplos de terrazas nivales y de cubetas de origen nival excavadas sobre el manto de alteración (Palacios y Andrés, 2000).

Una segunda área en la que aparecen los nichos nivales se localiza en las laderas de sotavento de los cordones morrénicos con una dirección noroeste - sureste, que constituyen una barrera topográfica frente a los vientos dominantes y, ocasionalmente, también aparecen ejemplos de nichos en las áreas de convergencia de dos morrenas (Palacios y Andrés, 2000). Finalmente, también existen nichos de nivación en las laderas occidentales del macizo, ocupando las cabeceras de los canales generados por el desencadenamiento de *debris flows* en el manto de alteración preglaciario (Palacios y Andrés, 2000).

Las parcelas de estudio establecidas para este trabajo se encuentran situadas en un nicho de nivación en forma de “hoyo” situado en el extremo septentrional del circo de Dos Hermanas

(figura 18). Este nicho está labrado sobre el manto de alteración y su suelo se encuentra cubierto por un pedregal de cantos y bloques angulosos y subangulosos que encuentran frecuentemente enraizados en el propio manto. La actividad geomorfológica es intensa y los bloques presentan una intensa movilidad anual sobre todo en las épocas de deshielo y en la temporada de lluvias otoñales. En la base del nicho se forman lenguas de solifluxión que, en su centro, se encuentran incididas por torrentes (Palacios *et al.*, 2003).

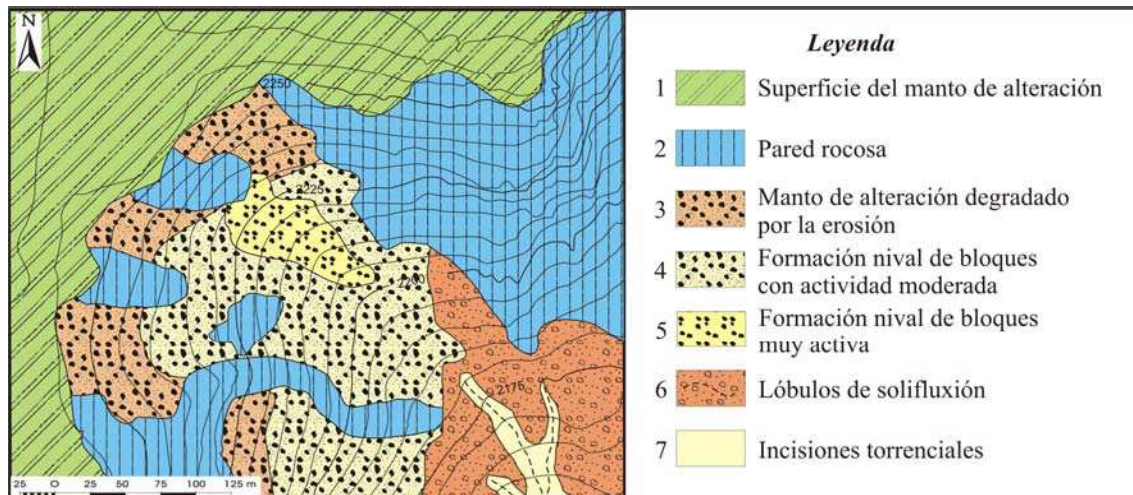


Figura 18: Mapa geomorfológico del nicho nival de Dos Hermanas en el Circo de la Laguna de Peñalara (adaptado de Palacios *et al.* 2003).

La acumulación de nieve es máxima en la zona central del nicho, en donde se superan los 220 días de nieve al año, y disminuye hacia el exterior en una serie de orlas más o menos concéntricas y es frecuente la formación de cornisas en su zona superior (figura 19). Las áreas de mayor persistencia de la nieve coinciden con las de mayor actividad geomorfológica y con las de menor cobertura vegetal (Palacios *et al.*, 2003).



Figura 19: Aspecto de las cornisas que se forman en la cabecera del nicho de Dos Hermanas. 05/04/2011.

Los nichos nivales situados en las cabeceras de los circos glaciares tienen también una vegetación determinada condicionada por la distribución y persistencia de la nieve y por las características geomorfológicas. En el nicho situado en la cabecera del circo de Dos Hermanas la vegetación aparece más o menos ordenada en orlas concéntricas. El área más externa, la que rodea al nicho, está cubierta por piornal - enebreal (*Senecio pyrenaicum-Cytisetum oromediterranei*) o por un pastizal psicoxerófilo (*Hieracium myriadeni-Festucetum curvifoliae*) y la cobertura vegetal supera el 80%. Hacia el interior del nicho la cobertura vegetal va disminuyendo y la composición vegetal varía disminuyendo la presencia de las especies psicoxerófilas. Conforme nos acercamos al centro del nicho la cobertura se reduce y aparecen especies como *Senecio carpetanus* y *Gentiana lutea*, *Agrostis trunctula*, *Leucanthemopsis pallida*, *Jasione crispa*, *Paronychia polygonifolia* y *Festuca iberica*. En el sector central la duración de la nieve es máxima y el periodo de actividad vegetal corto. La cobertura vegetal no supera el 20% y las especies que aparecen están adaptadas a estas condiciones extremas. Las especies más representativas son *Festuca ibérica*, *Luzula carpetana*, *Campanula herminii* y *Mucizonia sedoides*. Esta última es la única especie que aparece en los puntos donde la nieve perdura más de 220 días al año. La parte inferior del nicho nival presenta una vegetación formada por una combinación de *Nardus stricta* con especies nitrófilas (*Rumex pyrenaicus*, *Cerastium ramossisimum*) e hidrófilas (*Veronica langei*, *Campanula herminii*) (Palacios *et al.*, 2003).

Como se ha comentado, este nicho de nivación se caracteriza por la elevada persistencia de la nieve y por su intensa actividad geomorfológica, y estos factores condicionan la vegetación, su variación, cobertura espacial y composición florística. Por lo tanto, la dinámica y evolución que presenta la vegetación puede funcionar como indicador de la actividad geomorfológica y nivológica. La íntima relación existente entre los tres factores (geomorfología, nivología y vegetación) queda claramente reflejado en la figura 20, adaptado de Palacios *et al.*, 2003.

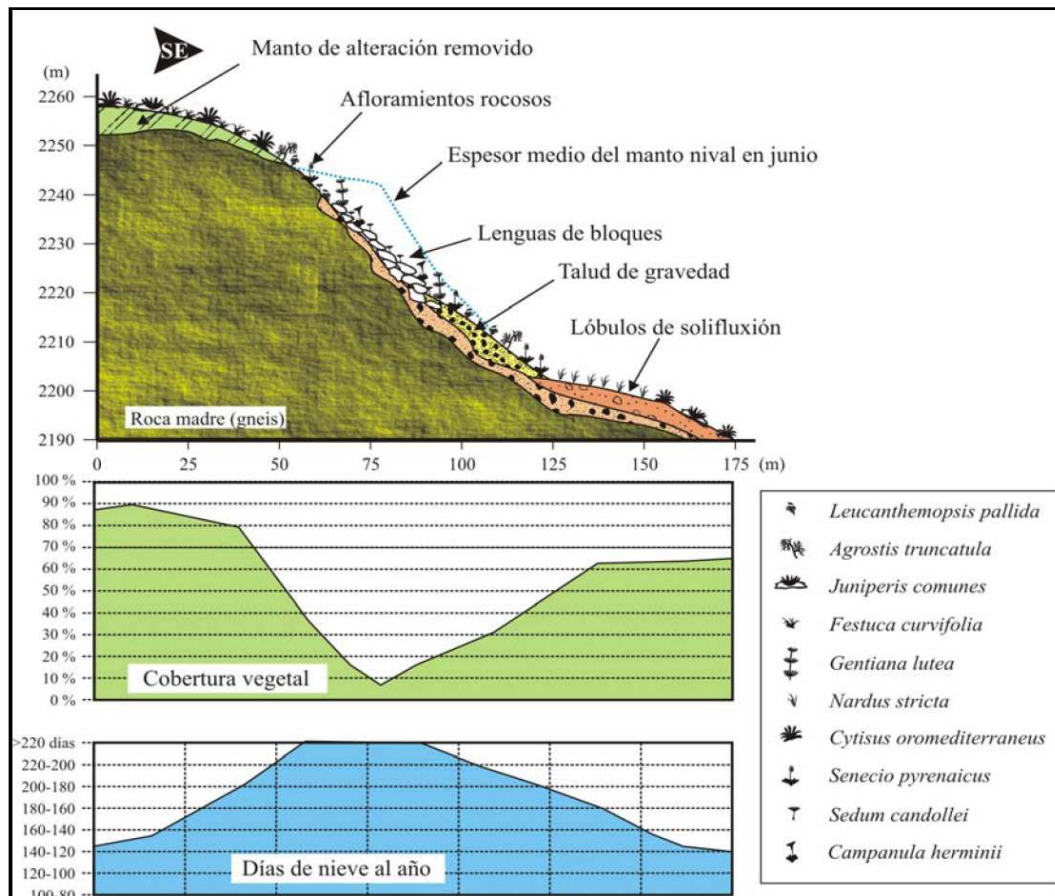


Figura 20: Resumen de las características y dinámica de los nichos nivales en Dos Hermanas en el Circo de la Laguna de Peñalara (adaptado de Palacios *et al.* 2003).

La evolución de la vegetación en los nichos de nivación de la sierra de Guadarrama ha sido objeto de estudio por distintos autores (Muñoz y García, 2004; Andrés *et al.*, 2007; García *et al.*, 2009; García y Muñoz, 2010). Como cabe esperar, los cambios en la vegetación de los nichos de nivación están íntimamente relacionados con las variaciones en los parámetros meteorológicos. Muñoz y García (2004), en los ventisqueros de la Condesa y de Valdemartín, y García *et al.* (2009), en el Puerto de los Neveros, han detectado, a lo largo de la segunda mitad del siglo XX, una reducción de la superficie ocupada por la vegetación quionófila y, de forma simultánea, una expansión de los matorrales densos de piorno y jabino. En ambos casos, los cambios en la vegetación están ligados al aumento de la temperatura media y de las temperaturas medias de las extremas y con la disminución de la duración de la nieve, sobre todo en primavera, y de la pluviosidad. En concreto, García *et al.* (2009) han calculado la variación experimentada en el periodo 1951 - 2000 por distintos grupos de vegetación relacionándola con las variaciones climáticas y han llegado a la conclusión de que los grupos de vegetación ligados a la existencia de nieve han disminuido en superficie y han sido sustituidos por otras formaciones vegetales de forma simultánea al ascenso de temperaturas medias y a la disminución de las precipitaciones, a la reducción de la duración del manto de nieve y al aumento de la aridez. Así, la vegetación de los ventisqueros, que está fuertemente vinculada a la presencia y persistencia del manto de nieve, está siendo sustituida

paulatinamente por pastizales psicroxerófilos, que colonizan las partes externas de los neveros, y estos, a su vez por matorrales cada vez más densos de piorno o piorno y enebro, ya que éstos están mejor adaptados a los ambientes áridos de alta montaña, al aumento de las temperaturas y a la disminución de las precipitaciones y de la nieve. Además, García *et al.* (2009) han detectado diferentes fases en la evolución de la vegetación en estos espacios, vinculadas a distintas evoluciones en las variables climáticas. Resultados similares se han obtenido en otros neveros permanentes o semipermanentes de las cumbres de la Sierra de Guadarrama como el del Puerto de los Neveros por García y Muñoz (2010), donde también se ha producido un aumento de los matorrales densos y una disminución de las formaciones herbáceas asociado a los cambios en las variables climáticas.

De toda la descripción realizada del Macizo de Peñalara y su evolución se puede señalar como conclusión que el relieve actual del Macizo de Peñalara es el resultado de la acción de numerosos agentes, entre los que destaca la acción glaciaria, y que se caracteriza por presentar una fuerte asimetría que es el resultado de la diferente actuación espacial de los agentes morfogenéticos a lo largo del tiempo.

Actualmente los procesos morfogenéticos más importantes están ligados a la presencia de la nieve y su intensidad es mayor en las áreas en las que ésta es más persistente y duradera. Otros procesos geomorfológicos como la acción torrencial o determinados movimientos de ladera tienen una acción secundaria sobre los materiales generados en la nivación y sobre el manto de alteración preglaciaria.

Otra de las características del Macizo de Peñalara es su dinamismo. Existen numerosos procesos que se encuentran activos en la actualidad y que dan lugar a cambios en el relieve, en la vegetación y en las condiciones climáticas, y todos ellos actúan de forma simultánea y se relacionan entre sí como partes de un sistema que se realimentan en determinados momentos y contrarrestan en otros, y que tiene como resultado el paisaje actual del Macizo.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA Y DATOS

Como ya se ha comentado en la introducción, las variaciones térmicas del suelo son uno de los factores que condicionan los procesos de ladera en montaña. Las oscilaciones de la temperatura en el interior del suelo dan lugar a procesos de hielo/deshielo del agua contenida en éste, que en forma líquida actúa como lubricante favoreciendo los movimientos en masa. Además, este proceso de hielo/deshielo también provoca la disgregación de la roca y la reducción del tamaño de los materiales que componen el suelo, facilitando su movimiento. Por lo tanto, el comportamiento térmico del suelo en un espacio de montaña es uno de los parámetros fundamentales para explicar su relieve.

La temperatura del suelo depende de múltiples factores entre los que la cobertura nivosa desempeña un importante papel. La relación entre las temperaturas de suelo y la erosión en medios de montaña ya fue estudiada por Hobbs en 1910; este autor estableció la idea de que la abundancia de agua de deshielo bajo la nieve y la proximidad de la temperatura de la superficie de la base del nevero a 0°C favorece el proceso hielo/deshielo y hace que aumente la intensidad y la frecuencia de procesos erosivos en los neveros. Esta hipótesis hizo que, a partir de ese momento, aumentase el número de trabajos orientados a la monitorización de las temperaturas del suelo en áreas con un manto de nieve estacional permanente (Grawe, 1936; Gardner, 1969; Thorn, 1976 y 1979; Hall, 1980; y Thorn y Hall, 1980). Los resultados de estas investigaciones demuestran que la nieve actúa como un aislante térmico que hace que la amplitud térmica del suelo disminuya y, en contra de lo propuesto por Hobbs (1910), también se reducen los ciclos hielo/deshielo y los procesos ligados a ellos.

En España se han realizado monitorizaciones de la temperatura del suelo en distintas cadenas montañosas con el fin de establecer las relaciones existentes en ellas entre la temperatura del suelo, la presencia de un manto estacional de nieve y los procesos erosivos de ladera. Así, Salvador *et al.* (2011), realizaron una caracterización de la capa activa de un glaciar rocoso en Sierra Nevada estableciendo la evolución anual de las temperaturas del suelo a lo largo del año y poniendo en relación esta evolución con la degradación de las capas de suelo helado situadas bajo la superficie. En esta misma línea se han realizado trabajos en la Sierra de Gredos (Muñoz *et al.*, 1995; Martínez de Pisón y Palacios, 1998) y en otras sierras de la Península Ibérica (Teles *et al.*, 2002).

En la Sierra de Guadarrama, dado su carácter de montaña templada de clima mediterráneo, son frecuentes diversos procesos de ladera que dan lugar a morfologías características entre los que se encuentran los nichos nivales. El estudio de la formación y evolución de estos nichos precisa del conocimiento detallado de la evolución de las temperaturas en su suelo. Así, a lo largo de las últimas dos décadas se han sucedido proyectos orientados a la monitorización de las temperaturas del suelo en varios puntos de Guadarrama que han tenido como consecuencia trabajos en los que se establece la relación entre las temperaturas del suelo, la ocurrencia de procesos erosivos, la presencia de nieve y las características de la

vegetación (Palacios y García, 1997a; Andrés y Palacios, 2004, 2005 y 2010; Marcos y Palacios, 2004; Muñoz *et al.*, 2007; Andrés *et al.*, 2007; García y Muñoz, 2010). En concreto, Andrés y Palacios (2010) han llevado a cabo una monitorización de las temperaturas del suelo y de la cobertura nival en la cabecera del río Manzanares realizando medidas en puntos de diferentes características geomorfológicas, nivológicas y meteorológicas, y han establecido la relación entre estas variables.

En este contexto, en el presente trabajo se analizan las temperaturas del suelo en dos puntos situados en un nicho de nivación del Macizo de Peñalara con el fin caracterizar el mismo y, además, de poder realizar comparaciones con otros espacios próximos que presentan una gran similitud fisiográfica y que ya se han estudiado utilizando una metodología similar (Muñoz *et al.*, 2007; Muñoz y García, 2009; Andrés y Palacios, 2010; García y Muñoz, 2010).

Tradicionalmente, la observación de las variables meteorológicas en áreas de montaña se ha llevado a cabo mediante la realización de medidas manuales en estaciones situadas en cotas elevadas. Este tipo de observaciones son de gran importancia puesto que suponen la medida sistemática de variables que no se observan normalmente en las estaciones convencionales.

La diversidad topográfica y geográfica (orientaciones, pendientes, altitudes) de las áreas de montaña tiene como consecuencia una alta variabilidad de parámetros meteorológicos como la temperatura, la insolación, la precipitación y la acumulación y persistencia de la nieve. Como consecuencia, los resultados obtenidos sólo son representativos de un entorno concreto y son difíciles de extrapolar a otras zonas próximas pero de características geográficas diferentes (con distinta pendiente, orientación o exposición). De igual forma, en un punto concreto de un macizo montañoso, con unas condiciones fisiográficas determinadas, no es fácil establecer hipótesis sobre sus características climáticas a partir de observaciones realizadas en otros puntos próximos, si estos se encuentran a distinta altitud, orientación, pendiente o exposición al régimen de vientos que el primero.

La mala accesibilidad de las estaciones de medida y las condiciones adversas en las que se realizan éstas dan lugar a una escasez de series con la longitud y periodicidad suficientes. Además, la observación en montaña exige la instalación de equipos de medida más robustos que los convencionales y que estén diseñados para soportar condiciones de temperatura, precipitación y viento muy desfavorables durante largos periodos de tiempo. En ocasiones es necesario utilizar equipos especiales destinados a la medida de variables específicas de áreas de montaña, como puede ser el espesor, la extensión o las características del manto de nieve.

Las mejoras tecnológicas que se han producido a lo largo de la segunda mitad del siglo XX han permitido facilitar las observaciones meteorológicas en montaña. El desarrollo de estaciones meteorológicas automáticas cada vez más precisas y robustas permite realizar observaciones en condiciones rigurosas de forma sistemática y homogénea. Además, la mejora en las técnicas de almacenamiento de la información permite que estas observaciones sean

acumuladas en equipos diseñados a este efecto a lo largo de grandes periodos de tiempo. Un tercer adelanto técnico que ha permitido obtener información de la superficie terrestre ha sido el desarrollo de la teledetección. Desde que comenzó el desarrollo de la observación de la superficie de la tierra con técnicas de teledetección uno de los objetivos planteados ha sido la realización de observaciones en zonas de acceso difícil como las de montaña. La utilización de técnicas de teledetección en este caso resulta muy ventajosa, porque permite la realización de observaciones simultáneas en áreas extensas y, además, es posible repetir estas observaciones de forma sistemática a lo largo del tiempo.

En la actualidad, la metodología más común para las observaciones de las temperaturas de suelo en áreas de difícil acceso consiste en la realización de un sondeo y en la colocación de un conjunto de sensores de temperatura situados a profundidades conocidas. Estos sensores se encuentran conectados a equipos *datalogger* que permiten el almacenamiento de las observaciones realizadas con una periodicidad determinada. Cada cierto tiempo se realiza un volcado manual de la información almacenada en el *datalogger* y se depuran los datos.

A pesar de la automatización de las medidas, las observaciones meteorológicas en montaña todavía generan series de datos con largos periodos sin información. Las lagunas en la series de datos debidas a la existencia de periodos sin observaciones, detección de datos erróneos o de poca calidad en el proceso de depuración, problemas en el funcionamiento de los equipos de medida y cambios en la metodología de la observación no permite realizar un análisis completo y correcto de los datos, ni calcular valores estadísticos significativos de estas series que apoyen la formulación de hipótesis sobre el comportamiento de las variables estudiadas.

Para la instalación de la estación de medida de las temperaturas de suelo se ha elegido un nicho nival en la cabecera del circo de Dos Hermanas, debido a que este es uno de los sectores del área de estudio en las que más nieve se acumula y en las que más duradero es el manto nivoso. Dentro del nicho, se han seleccionado dos parcelas separadas 60 metros para localizar los termómetros de suelo siguiendo el criterio de que presenten la máxima diferencia de cubierta de manto de nieve y, sin embargo, se encuentren en el mismo ambiente. Las ubicaciones de las estaciones de medida se detallan en la figura 21.

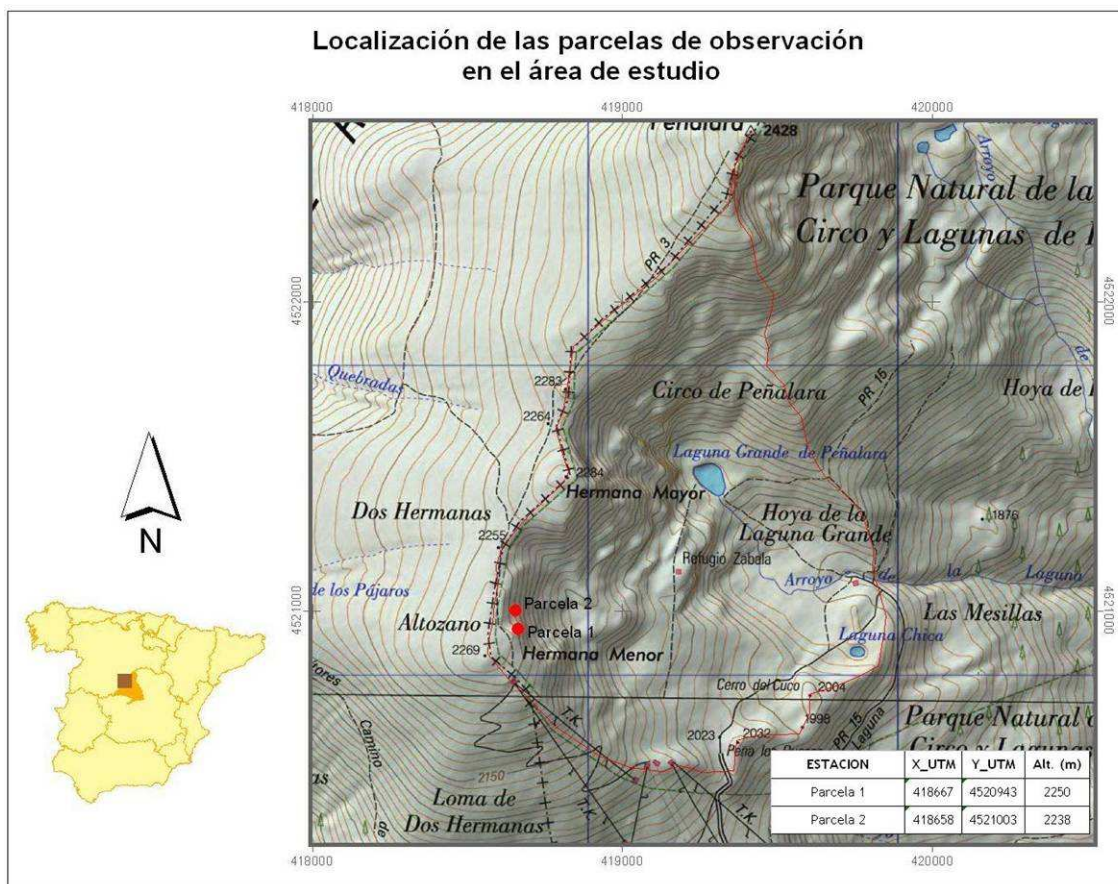


Figura 21: Localización de las parcelas de observación.

A pesar de la proximidad de las dos estaciones de medida, las dos parcelas presentan patrones muy diferentes en lo que respecta a acumulación y persistencia de la nieve. La parcela 1, situada a 2.250 metros de altitud en un lateral del nicho nival, es la que presenta menor persistencia y acumulación de nieve, mientras que la parcela 2 está a 2.238 metros en la zona central del nicho y registra mantos de nieve más espesos y duraderos y una mayor actividad geomorfológica. Estas diferencias nos van a permitir relacionar la presencia de nieve con las temperaturas del suelo.

En cada parcela se ha instalado un conjunto de sensores de medida de la temperatura a distintas profundidades. Por distintas razones (problemas con los equipos de medida, pérdida de sensores) los registros obtenidos no presentan un patrón constante de localización, de forma que las profundidades de observación presentan diferencias de unos años a otros y entre las dos estaciones de medida. En la figura 22 aparece resumida la información sobre observaciones existentes en las dos parcelas.

La temperatura del aire sólo se registra en una de las parcelas pero, dada la proximidad entre ambas, puede considerarse común a los dos puntos de observación. Además, sólo se dispone de información de la temperatura del aire los años 2004, 2005, 2006, 2009 y 2010 (figura 22). De forma puntual, para ilustrar ejemplos y casos de estudio concretos ocurridos en periodos en los que no se dispone de temperatura del aire, se ha utilizado información de la serie de temperaturas del Observatorio de Navacerrada, cuyas condiciones son similares a las del área

de estudio y pueden servir, en una primera aproximación, para tener una estimación de las temperaturas esta área.

AÑO / PARCELA		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
	AIRE				X	X	X			X	X	
PARCELA 1	0						X					
	10	X	X	X	X	X	X			X	X	X
	15	X	X	X	X	X						
	30					X	X					
	60											
	80	X	X	X	X	X	X			X	X	X
PARCELA 2	0								X			
	10	X	X	X	X					X	X	X
	15	X	X	X								
	30											
	60				X							
	80	X	X	X	X			X	X	X	X	X

Figura 22: Resumen de la existencia de datos.

Se han utilizado sondas HOBO Pendant 64K Temp/Light, dotadas de termistores TMC-1T, encapsuladas y aisladas de la humedad. Los termómetros están equipados con una batería de litio de 3,6 V con capacidad para tomar medidas durante 760 días cada 30 minutos y tienen una precisión de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ y un rango de medida de -20°C a 50°C .

El tratamiento de los datos ha comenzado con el cálculo de los valores medios y extremos diarios de temperatura a cada profundidad a partir de los valores horarios registrados. Se obtiene así una serie en la que existen tres datos diarios; temperatura media, temperatura máxima y temperatura mínima.

Posteriormente, se ha llevado a cabo un proceso de depuración de la información obtenida siguiendo tres criterios. En primer lugar se han desestimado todas las observaciones erróneas o inseguras debido a su falta de homogeneidad con los datos próximos espacial y temporalmente. De esta forma, se eliminan los picos de observación que son resultado de errores de medida, la mayor parte de las veces por causas técnicas. También se han eliminado los datos dudosos del principio de la temporada, porque se han supuesto registrados en momentos en los que el sensor no se encontraba todavía térmicamente estable. Un último grupo de registros que se ha eliminado corresponde al caso en el que la medida en un sensor no cambia durante un periodo largo de tiempo, mientras la registrada en el resto de los sensores sí lo hace. Este hecho es indicativo del mal funcionamiento de ese sensor que no responde adecuadamente a las oscilaciones térmicas de su entorno.

La realización de esta depuración ha dado como resultado una serie de datos de mayor calidad, pero que presenta un elevado número de lagunas y, además, debido a la heterogeneidad de las profundidades de medida, no permiten ser comparadas ni entre sí ni cada una consigo misma.

Las profundidades de observación más estables en el tiempo son las de 10 y 80 centímetros (figura 22); a estas profundidades tenemos información de los años 2001 a 2006, 2009, 2010 y 2011 en la parcela 1 y de los años 2001 a 2004, 2009, 2010 y 2011 en la parcela 2. Para obtener una serie con datos a profundidades constantes se han estimado, a partir de los valores reales en un determinado día, los valores de la temperatura a las profundidades 20 y 50 centímetros. Este objetivo se ha conseguido realizando una interpolación lineal entre los registros reales más próximos. Así, en el caso de que los registros reales se hayan obtenido a 10, 30 y 80 centímetros de profundidad el valor estimado a 20 centímetros se ha calculado realizando una interpolación lineal entre los valores reales registrados a 10 y a 30 centímetros y el valor estimado a 50 centímetros mediante la interpolación de los valores reales de 30 y 80 centímetros. Se ha optado por no realizar extrapolaciones para obtener valores a profundidades inferiores a 10 centímetros o superiores a 80 centímetros por la falta de exactitud que supone esta estimación. Las profundidades de 20 y 50 centímetros se han elegido por similitud con las recomendadas por la WMO (Organización Meteorológica Mundial) para la observación de las temperaturas de subsuelo (0, 5, 10, 20, 50 y 100 centímetros) (WMO, 2008). De esta forma, hemos conseguido una serie de datos diarios comparable consigo misma y con la otra estación.

Con la serie resultante se han calculado, mediante la utilización de una hoja de cálculo, los siguientes estadísticos para cada profundidad, temporada y parcela de observación:

- Valores medios diarios de la temperatura.
- Valor medio mensual de la temperatura media diaria
- Valor medio mensual de la temperatura máxima diaria
- Valor medio mensual de la temperatura mínima diaria
- Valor máximo mensual de la temperatura máxima diaria
- Valor mínimo mensual de la temperatura mínima diaria
- Valor medio estacional de la temperatura media diaria
- Valor medio estacional del gradiente térmico vertical
- Valor medio mensual de la oscilación térmica diaria
- Número de días mensual con el suelo helado
- Número de ciclos hielo/deshielo para cada temporada

El cálculo de los valores mensuales se ha realizado utilizando sólo los meses que tenían más de un 75% de observaciones. De esta forma, eliminamos aquellos meses en los que la existencia de lagunas en la serie de observación da como resultado valores dudosos o erróneos de los valores medios y extremos mensuales.

Esta depuración ha tenido como consecuencia que en algunas temporadas la información válida es muy limitada, y sólo se dispone de datos correctos un número escaso de meses, por lo tanto, se ha trabajado con aquellas temporadas en las que el número de meses sin información no es superior a 4.

En la figura 23 aparece resumida la información que se ha utilizado.

Es necesario destacar que, de todas las temporadas analizadas, solo se obtienen resultados significativos en las 2001 - 2002, 2002 - 2003, 2003 - 2004, 2005 - 2006 (sólo en la parcela 1), 2007 - 2008 (sólo en la parcela 2), 2009 - 2010 y 2010 - 2011. En el resto de las temporadas (2004 - 2005, 2006 - 2007 y 2008 - 2009), las lagunas existentes en las series de observación no permiten establecer resultados concluyentes de forma que su información se utiliza sólo de forma puntual.

Temporada/ Parcela	2001/2002	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006
Parcela 1	Oct/May	Dic/Ago	Nov/Jul		Sep, Dic/Ago
Parcela 2	Oct/May	Dic/Ago	Nov/Jul		
Temporada/ Parcela	2006/2007	2007/2008	2008/2009	2009/2010	2010/2011
Parcela 1				Oct/Ago	Sep/Ago
Parcela 2		Dic/Ago		Oct/Ago	Sep/Ago

Figura 23: Series resultantes de la depuración de los datos originales.

Esta información se ha tratado con una hoja de cálculo para obtener una serie de datos mensuales para cada parcela, temporada y profundidad de observación, que incluyen información de la temperatura media, la temperatura media de las máximas, la temperatura media de las mínimas, la temperatura máxima absoluta y la temperatura mínima absoluta.

Con los datos obtenidos a distintas profundidades de observación se puede cuantificar la variación vertical de la temperatura con la profundidad a partir del cálculo del gradiente vertical de temperaturas. En este caso se ha realizado un análisis estacional de esta variable, considerando otoño los meses de septiembre, octubre y noviembre; invierno los que diciembre, enero y febrero; primavera los de marzo, abril y mayo y verano junio, julio y agosto.

El gradiente vertical de temperatura se ha definido como

$$\text{Grad T} = (T_{\text{prof2}} - T_{\text{prof1}}) / (\text{prof2} - \text{prof1})$$

donde:

T_{prof1} : temperatura a la profundidad 1 (°C)

T_{prof2} : temperatura a la profundidad 2 (°C)

Prof1: profundidad 1 (metros)

Prof2: profundidad 2 (metros)

Grad T: gradiente vertical de temperaturas entre las profundidades 1 y 2 (°C/m)

A partir de los datos de temperatura máxima y temperatura mínima diaria para cada profundidad, se ha calculado la oscilación térmica diaria y, con estos valores, su valor medio mensual.

El número de días con suelo helado se ha calculado considerando que, en el caso de que esto ocurra, la temperatura máxima no supera en todo el día los 0°C. De esta forma, los días con suelo helado coinciden con los días en los que la temperatura máxima diaria es negativa.

Finalmente, el cálculo del número de ciclos de hielo - deshielo en el suelo se ha realizado teniendo en cuenta el número de veces que la temperatura cambia en el suelo de positiva a negativa (hielo) o de negativa a positiva (deshielo). Esta metodología y sus limitaciones serán analizadas de forma más exhaustiva en el capítulo 5.

CAPITULO 4. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de los datos de temperatura registrados en las dos estaciones de observación. Los resultados que se exponen son los que se han considerado más significativos para caracterizar el espacio desde el punto de vista térmico y para poner en relación las variables meteorológicas y geomorfológicas.

En primer lugar se presenta un resumen de la temperatura media diaria y mensual del aire por temporadas en la zona de estudio. En un segundo apartado se muestra, para cada temporada y parcela de observación, los valores medios diarios de la temperatura del suelo a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. En el tercer apartado aparecen, para cada temporada, parcela y profundidad, los valores medios mensuales de temperatura media y extrema diaria, y los valores extremos mensuales de las temperaturas máximas y mínimas.

En el apartado cuarto se analiza la variación vertical de la temperatura en el suelo de forma gráfica y numérica a partir del cálculo del gradiente vertical de temperatura en el suelo. En este caso, en lugar de los valores medios mensuales, se han calculado los valores medios estacionales con el fin de simplificar el análisis de los gráficos y de los valores.

En el apartado quinto aparecen los valores medios mensuales por temporada, parcela de observación y profundidad, de los valores medios mensuales de la oscilación térmica diaria.

En el apartado sexto se exponen los valores por temporada, parcela de observación y profundidad, del número de días con el suelo helado, suponiendo que esta situación se produce cuando la temperatura máxima diaria no supera los 0°C.

Finalmente, el último apartado se dedica a examinar, para cada temporada, profundidad y parcela de observación, el número de ciclos de hielo y deshielo que se registran.

El análisis de todos estos resultados permite realizar una primera aproximación a la caracterización de las parcelas de observación en su aspecto térmico, analizar la variación espacial y temporal de la temperatura del suelo y establecer las principales diferencias que se aprecian entre las dos parcelas relacionando estas diferencias con la diversidad geomorfológica existente entre ellas.

4.1. Temperatura del aire.

La temperatura del aire se toma en un solo punto que se considera representativo para las dos parcelas de estudio debido a su proximidad. Además, sólo se dispone de registros de temperatura del aire meses aislados de los años 2004, 2005, 2006, 2009 y 2010.

En la figura 24 aparece, resumida, la información registrada sobre temperatura del aire media y extrema a lo largo de los distintos años de observación. Estos datos se representan en las figuras 25 (datos diarios) y 26 (datos mensuales).

2004						2009					
Mes	Tª media	Tª media máximas	Tª media mínimas	Tª máxima absoluta	Tª mínima absoluta	Mes	Tª media	Tª media máximas	Tª media mínimas	Tª máxima absoluta	Tª mínima absoluta
Enero						Enero					
Febrero	-1,1	3,6	-4,5	10,8	-12,2	Febrero					
Marzo	-1,3	3,5	-4,6	13,4	-14,0	Marzo					
Abril	1,3	9,1	-3,3	27,6	-10,4	Abril					
Mayo						Mayo					
Junio						Junio					
Julio						Julio					
Agosto						Agosto					
Septiembre						Septiembre					
Octubre						Octubre	7,9	12,6	4,9	18,0	-2,3
Noviembre	1,9	5,6	-0,8	14,4	-5,9	Noviembre	1,2	4,5	-1,3	12,1	-8,2
Diciembre	-2,6	0,3	-4,8	7,7	-12,9	Diciembre	-1,6	2,0	-5,1	14,3	-14,2

2005						2010					
Mes	Tª media	Tª media máximas	Tª media mínimas	Tª máxima absoluta	Tª mínima absoluta	Mes	Tª media	Tª media máximas	Tª media mínimas	Tª máxima absoluta	Tª mínima absoluta
Enero	-1,6	3,0	-4,8	13,1	-17,2	Enero	-4,0	-1,1	-6,5	9,2	-15,0
Febrero	-4,7	2,6	-8,5	21,1	-16,2	Febrero	-3,5	0,8	-6,6	10,4	-14,5
Marzo	-0,1	6,2	-4,1	19,1	-17,9	Marzo	-1,9	3,0	-5,1	18,0	-14,6
Abril	2,1	7,1	-2,0	18,2	-10,6	Abril	3,6	10,1	-0,4	17,8	-7,8
Mayo	7,6	12,7	3,4	21,7	-2,5	Mayo	4,1	9,1	0,5	18,6	-8,0
Junio	14,0	19,8	8,7	26,9	3,3	Junio	9,7	14,6	5,7	22,9	-1,3
Julio	16,2	23,8	10,2	32,0	4,2	Julio	17,4	24,5	11,4	32,6	8,0
Agosto	15,3	21,4	10,0	29,3	0,8	Agosto	15,6	22,4	10,1	30,7	3,0
Septiembre	9,6	14,6	5,3	22,0	-4,5	Septiembre	10,4	16,3	6,3	24,4	-0,4
Octubre						Octubre	5,0	9,7	1,5	18,1	-3,1
Noviembre						Noviembre					
Diciembre	-1,8	1,7	-4,7	10,1	-12,0	Diciembre					

2006					
Mes	Tª media	Tª media máximas	Tª media mínimas	Tª máxima absoluta	Tª mínima absoluta
Enero	-3,2	1,1	-6,2	13,9	-15,0
Febrero	-2,4	3,2	-5,3	16,5	-10,8
Marzo	0,4	5,9	-3,2	19,6	-12,2
Abril	3,8	9,5	-0,1	18,5	-3,6
Mayo	8,5	13,8	3,9	23,2	-4,1
Junio	13,2	19,3	7,8	27,6	-0,1
Julio	16,8	23,4	11,0	30,8	6,0
Agosto	13,5	20,1	8,6	28,3	1,3
Septiembre	10,8	15,8	7,0	28,3	0,1
Octubre	6,5	10,0	3,8	19,3	-1,4
Noviembre	3,3	6,6	1,0	14,7	-3,6
Diciembre	-2,2	1,6	-5,0	11,3	-11,0

Figura 24: Resumen de los valores de temperatura media y extrema del aire por años.

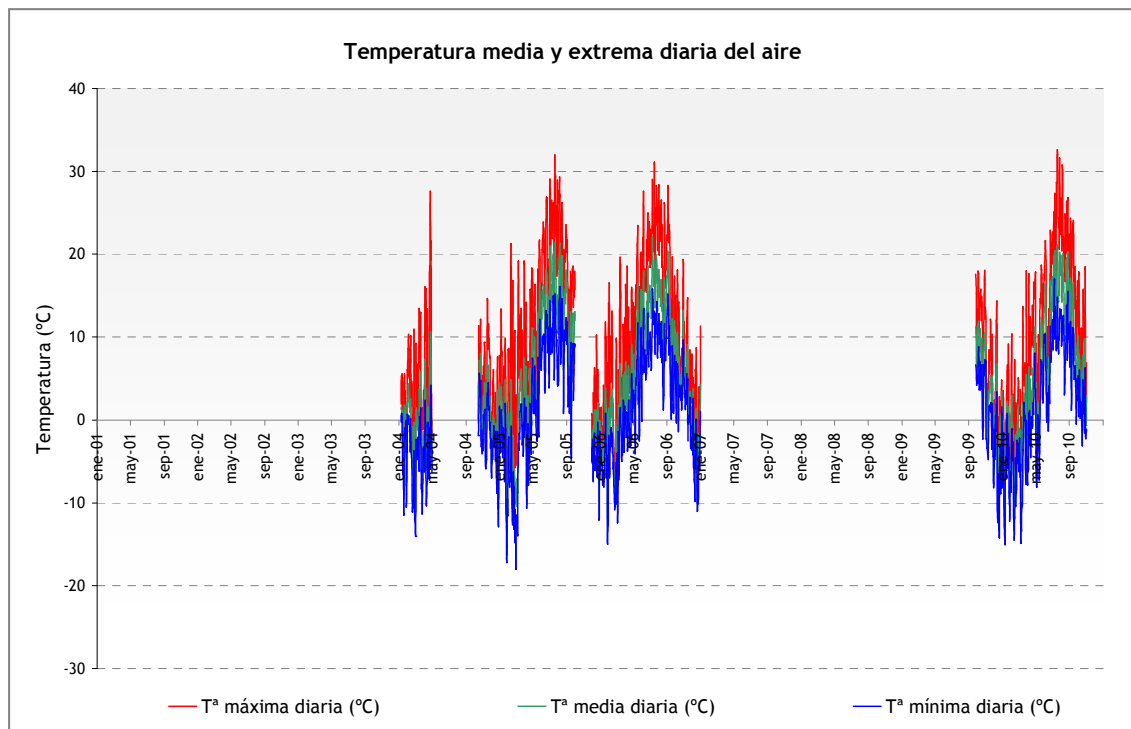


Figura 25: Temperatura media y extrema diaria del aire.

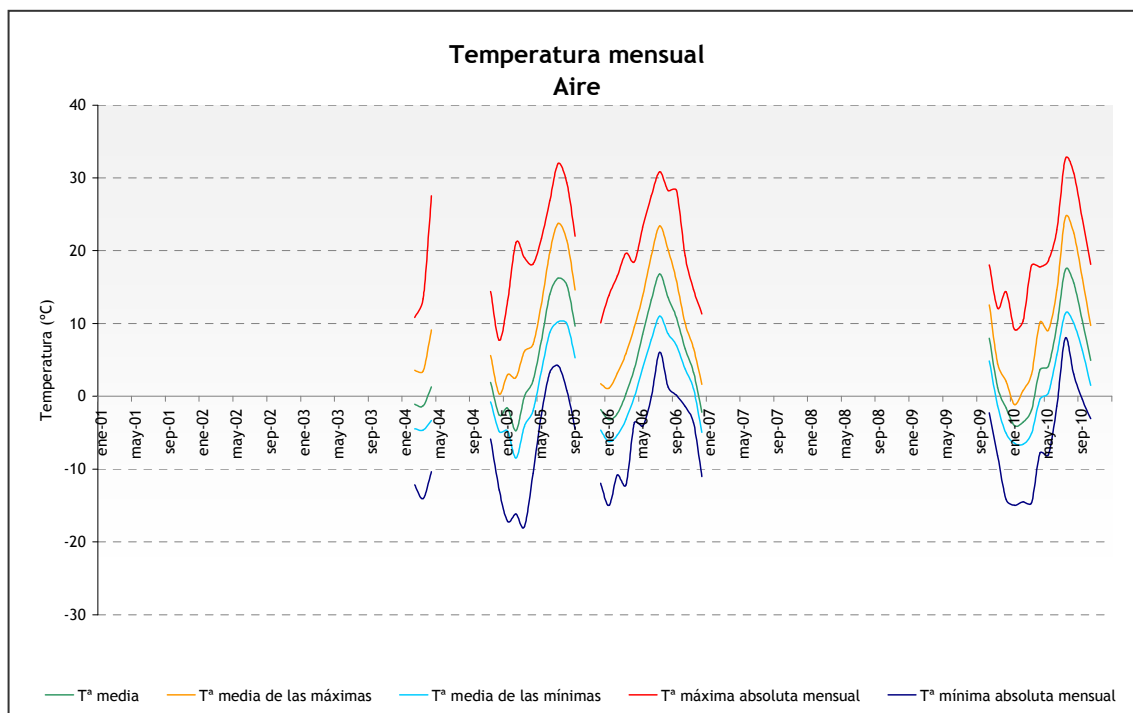


Figura 26: Temperatura media, media de las extremas mensual y extremas absolutas del aire.

La temperatura media de todos los años analizados más alta se registra en el mes de julio (16,8°C) y la más baja en los meses de enero y febrero (-2,9°C). La temperatura media es negativa entre los meses de diciembre y marzo. El mes más frío es febrero, con temperaturas medias que alcanzan -4,7°C el año 2005. La temperatura media anual total es de 5,3°C.

La temperatura media de las mínimas es negativa de diciembre a abril y su valor mínimo se alcanza, en la mayor parte de los años, en el mes de febrero.

Las temperaturas extremas absolutas son: 32,6°C, registrados el 31/07/2010, y -17,9°C, el día 31/03/2005.

Los registros de la temperatura del aire permiten observar el hecho de que ésta experimenta fuertes y rápidas variaciones. En efecto, en la serie de registros existente, se han detectado diez episodios en los que la temperatura media del aire experimentó, en 24 horas variaciones absolutas superiores a 8°C. El episodio más significativo se produjo entre los días 26 y 27 de enero de 2006 cuando la entrada de una masa de aire frío dio lugar a un descenso de la temperatura superior a 10°C, pasando de 0,6°C el día 26 a -10°C el día 27. Los días posteriores la temperatura del aire descendió hasta -12,7°C el día 28.

Estas oscilaciones en la temperatura del aire tienen consecuencias en la temperatura del suelo que, como se verá posteriormente, presenta una respuesta muy diferente en función del momento del año en el que se produzca y, sobre todo, de la existencia o no de un manto de nieve sobre el suelo.

4.2. Temperatura del suelo. Temperatura media diaria.

En las gráficas de las figuras 27 a 33 se representa, por temporadas, la evolución temporal de las temperaturas medias diarias del suelo a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros comparadas con la del aire (en las temporadas que existen datos).

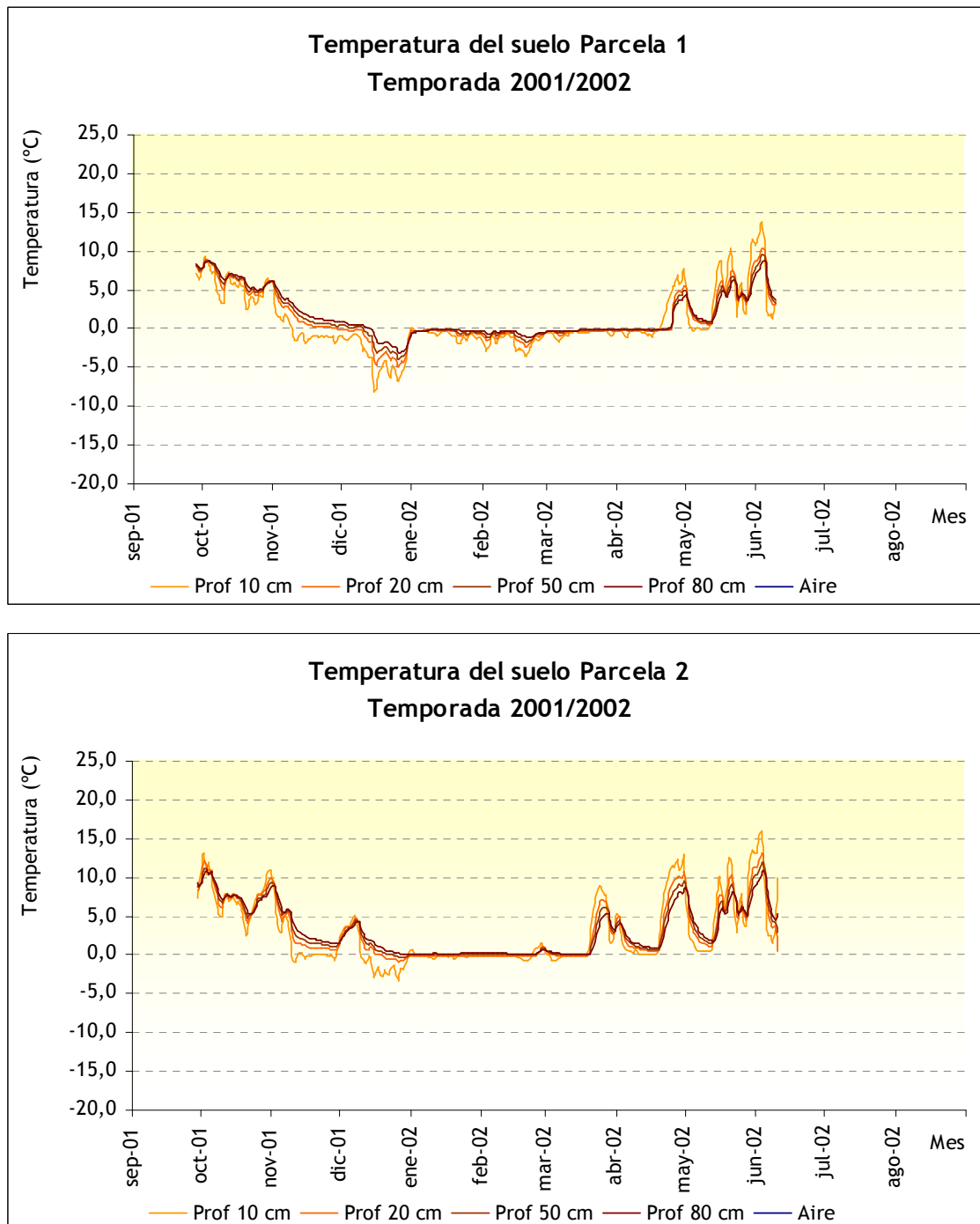


Figura 27: Evolución de las temperaturas medias diarias. Temporada 2001/2002.

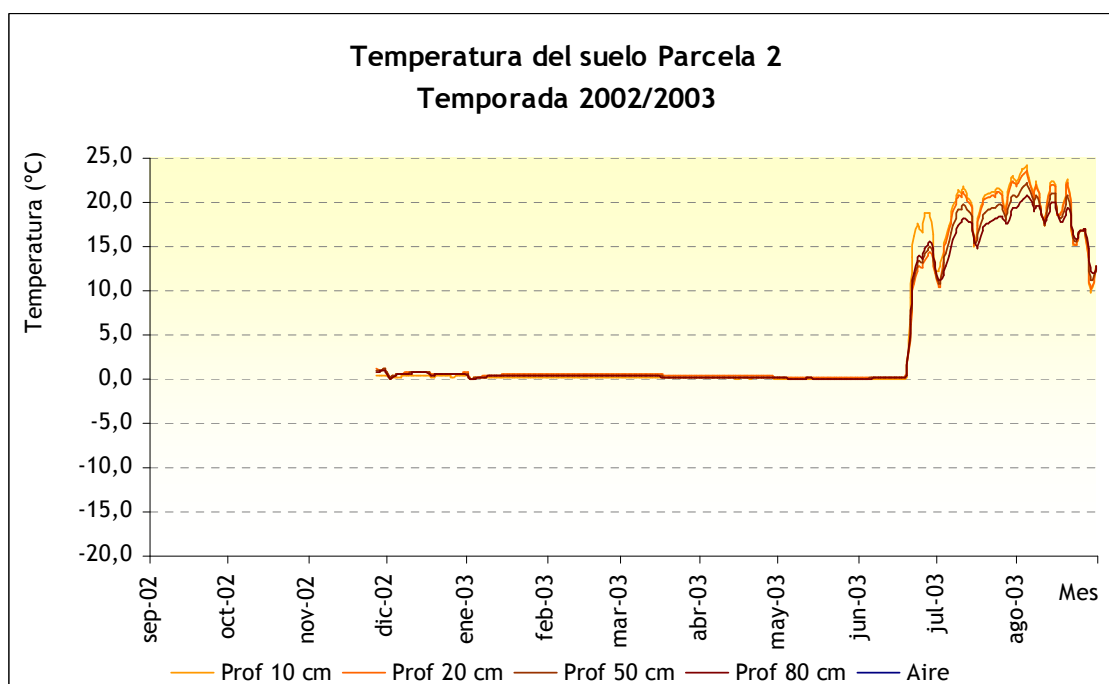
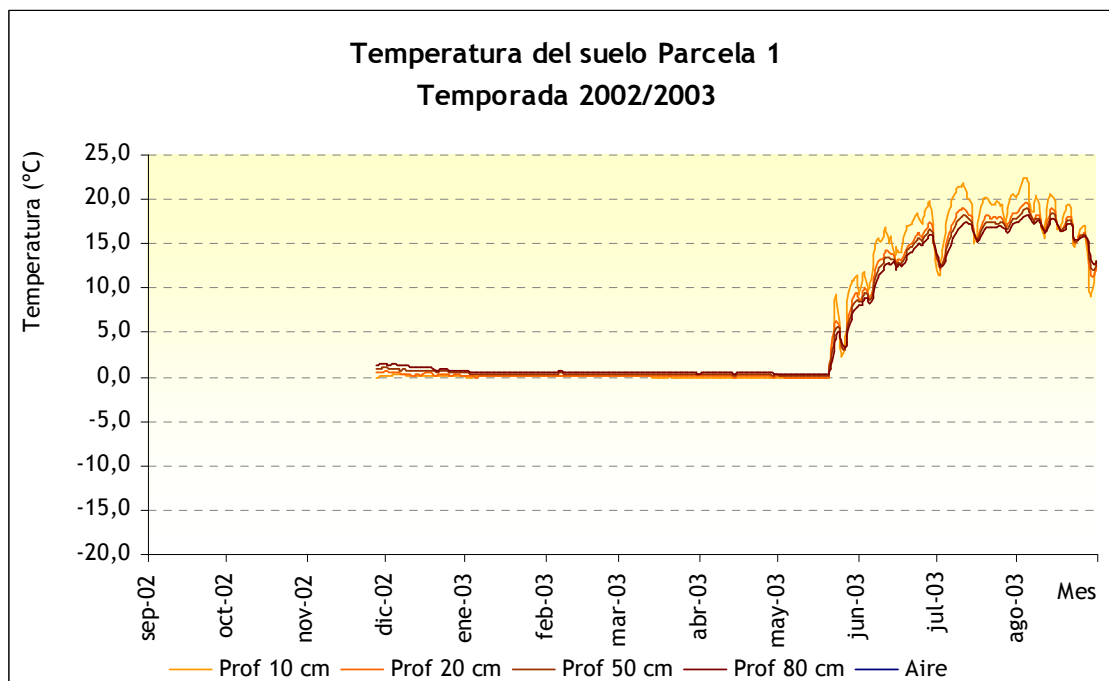


Figura 28: Evolución de las temperaturas medias diarias. Temporada 2002/2003.

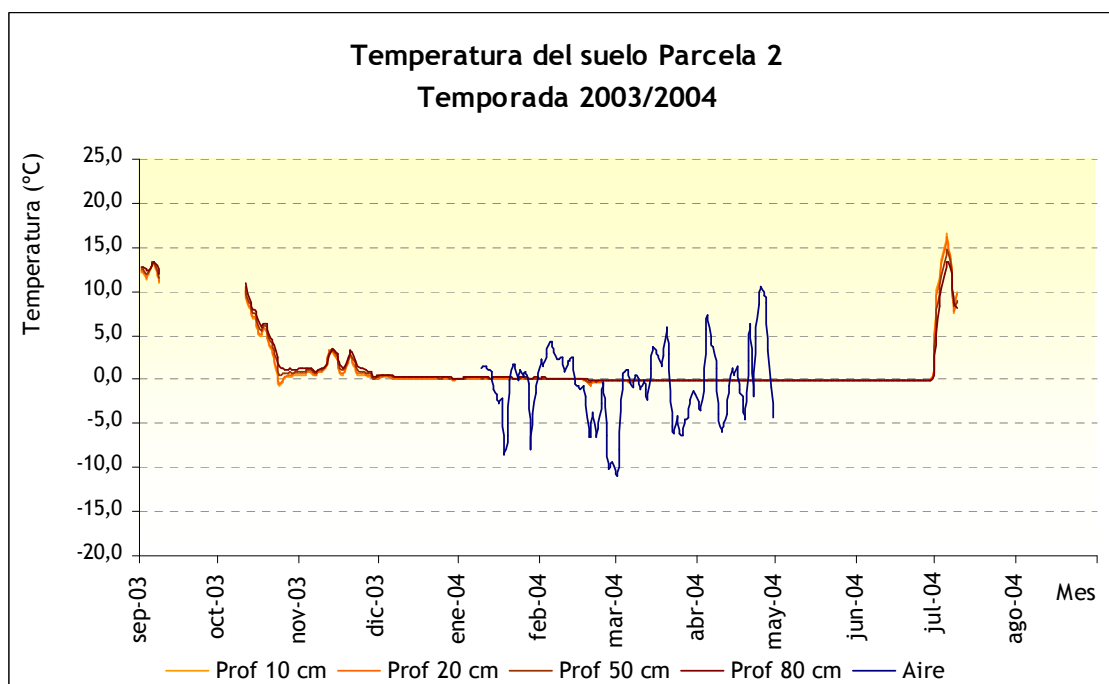
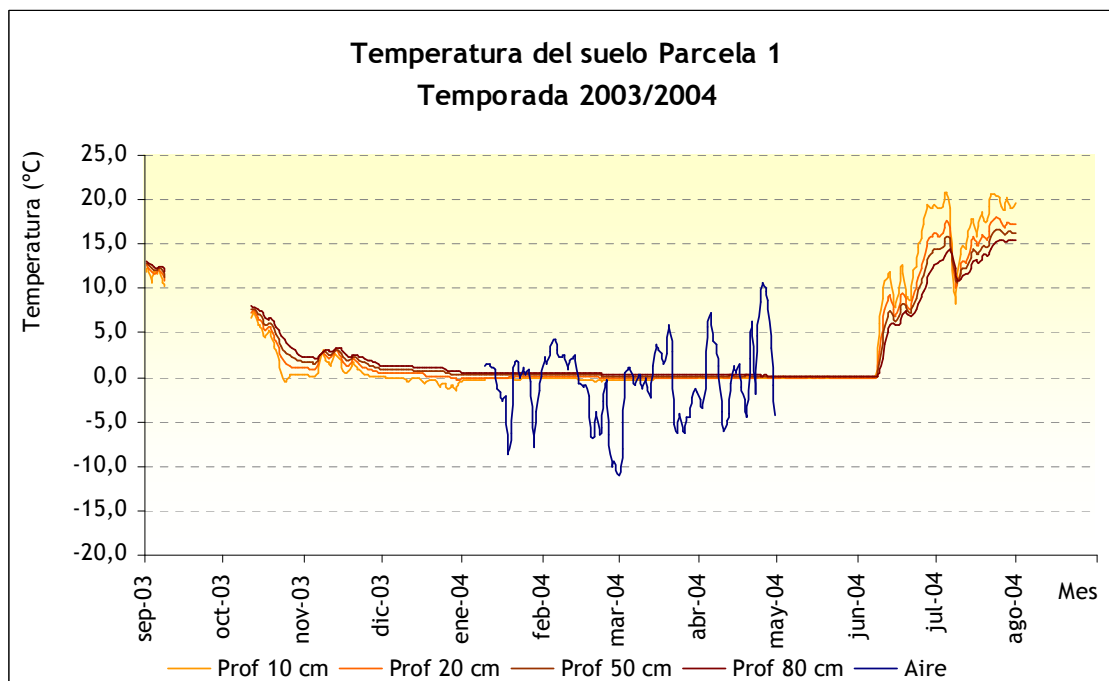


Figura 29: Evolución de las temperaturas medias diarias. Temporada 2003/2004.

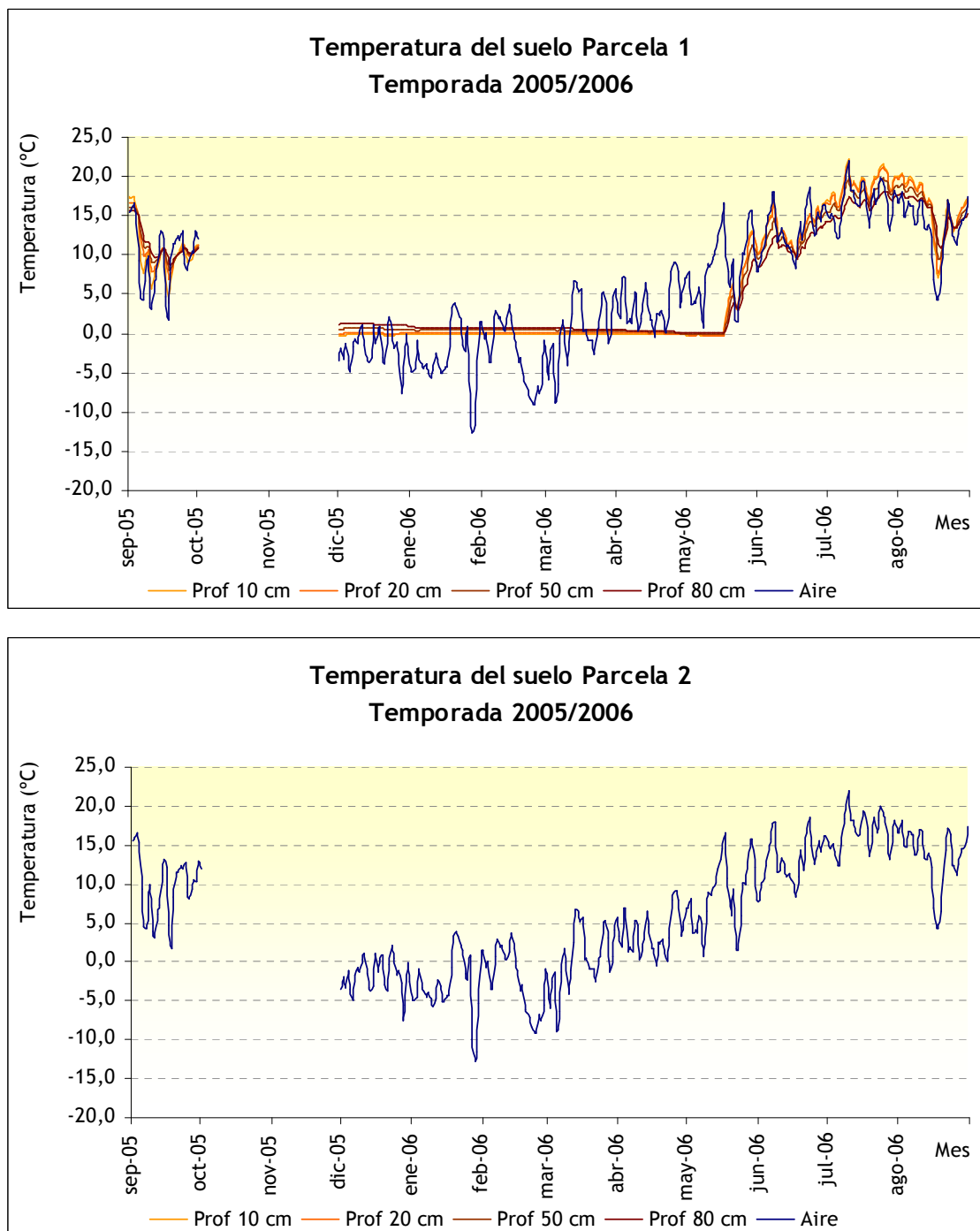


Figura 30: Evolución de las temperaturas medias diarias. Temporada 2005/2006.

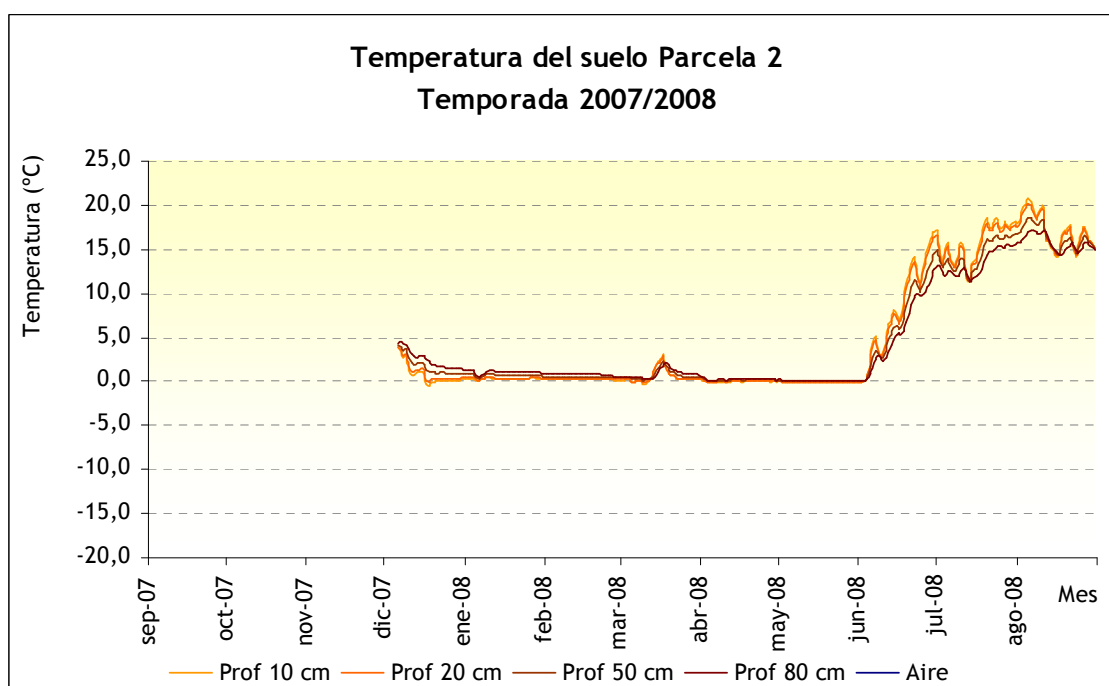
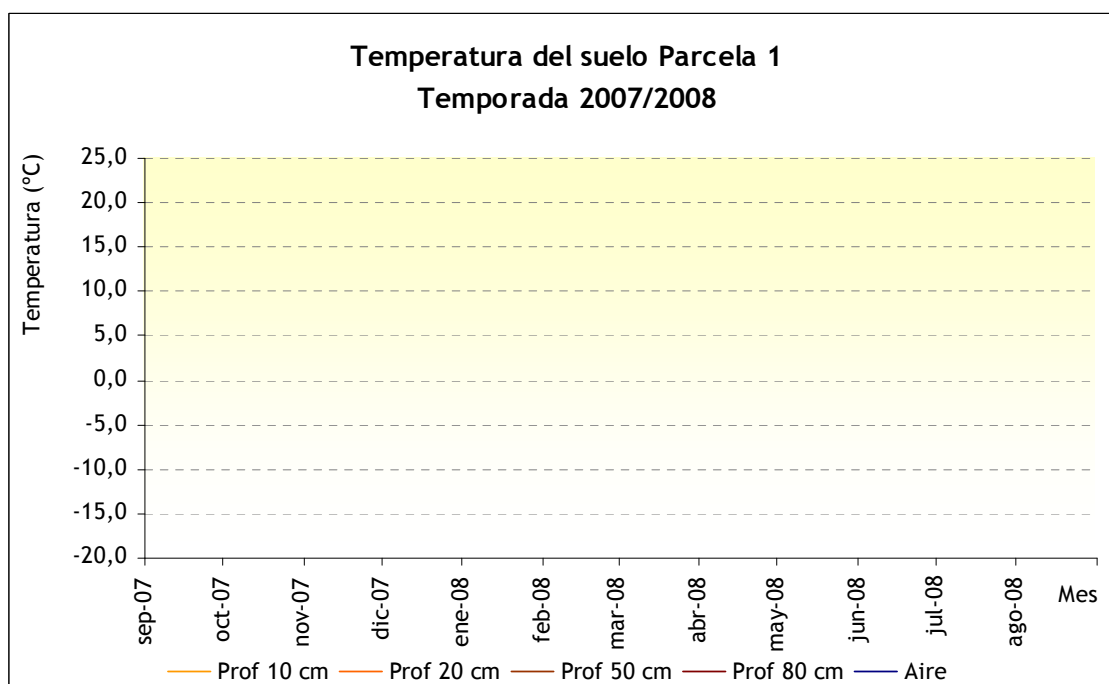


Figura 31: Evolución de las temperaturas medias diarias. Temporada 2007/2008.

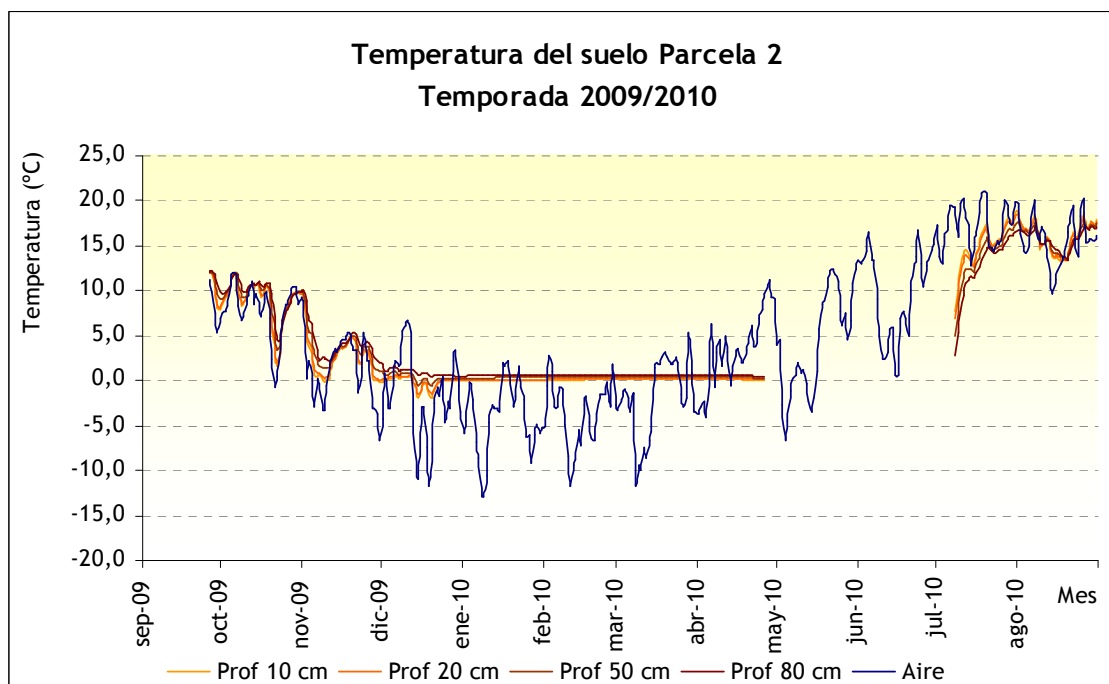
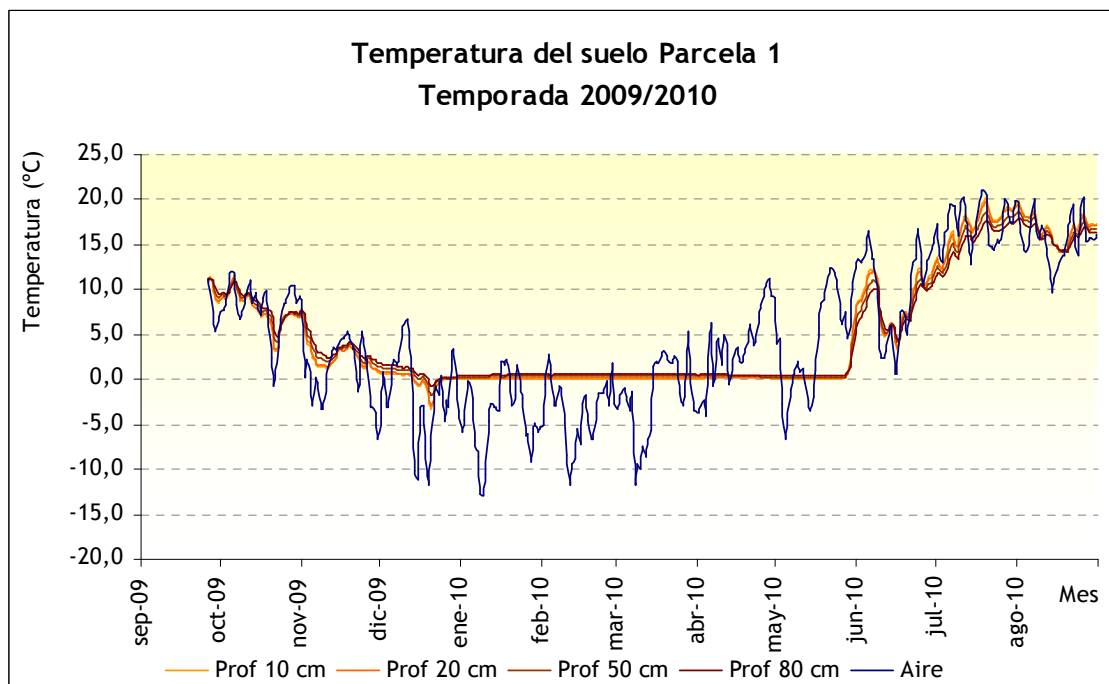


Figura 32: Evolución de las temperaturas medias diarias. Temporada 2009/2010.

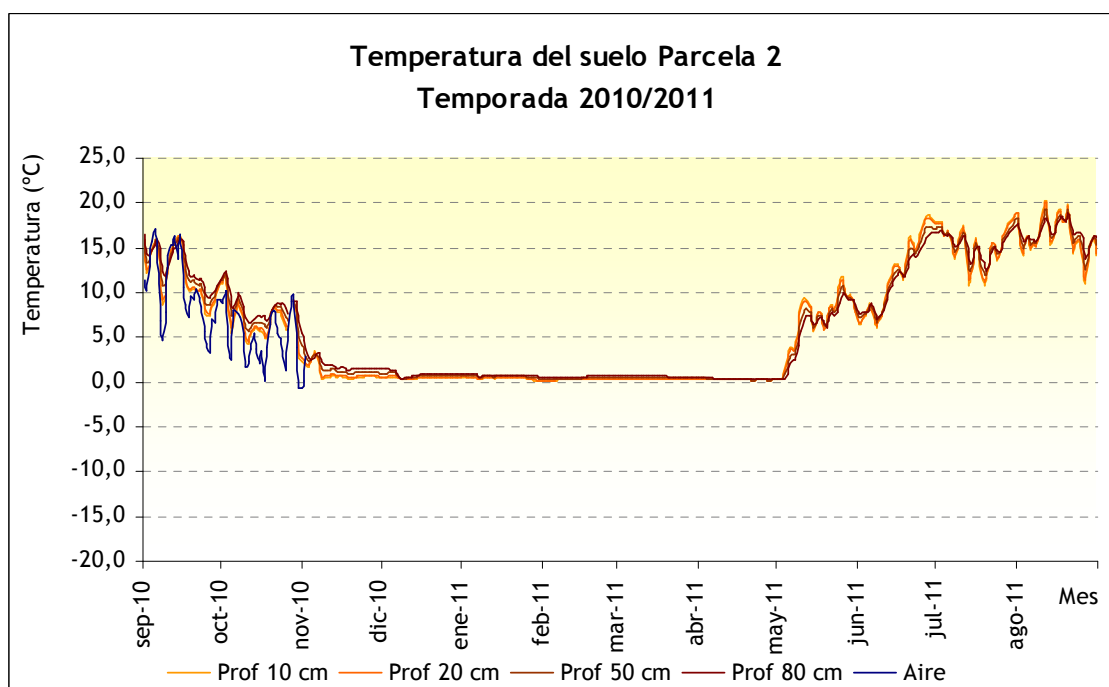
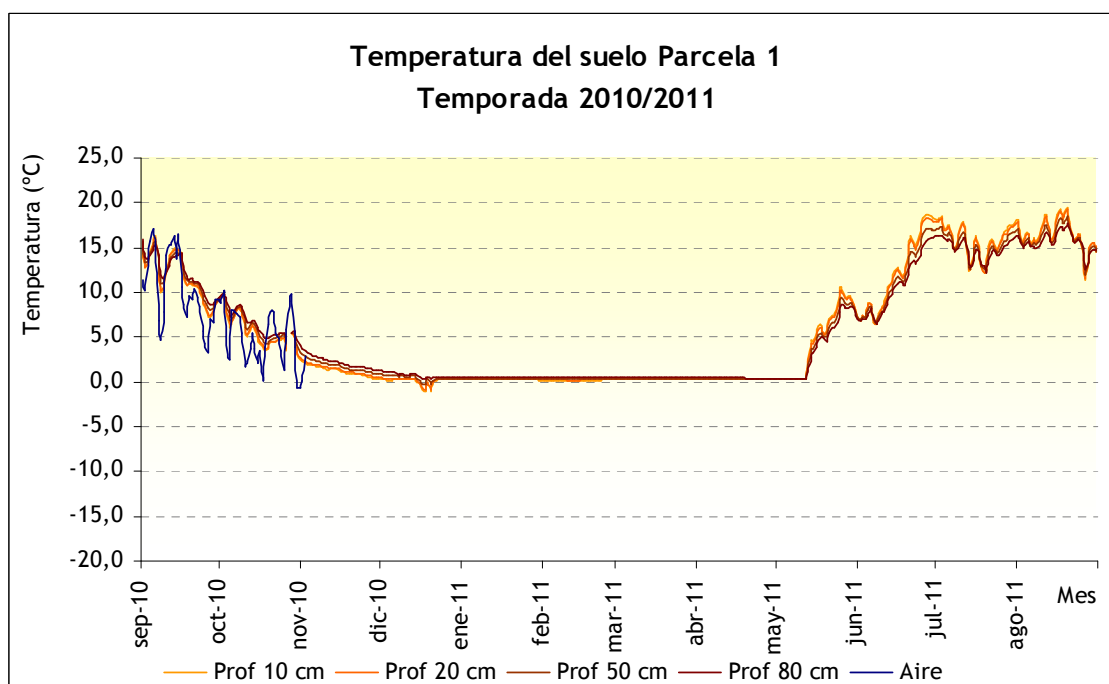


Figura 33: Evolución de las temperaturas medias diarias. Temporada 2010/2011.

Para llevar a cabo un análisis correcto de los resultados se ha de partir del hecho de que las dos estaciones se encuentran muy próximas, pero tienen características locales que las diferencian. La parcela 1, situada a 2.250 metros de altitud en un lateral del nicho nival, es la que presenta menor persistencia y acumulación de nieve, mientras que en la parcela 2 está a 2.238 metros, en la zona central del nicho y registra mantos de nieve más espesos y duraderos y una mayor actividad geomorfológica (Marcos y Palacios, 2004).

La proximidad de las dos parcelas de observación hace que presenten un comportamiento térmico similar, sin embargo, un análisis más detallado de los datos permite señalar contrastes significativos en las temperaturas del suelo de cada una de ellas que están relacionados con las diferencias existentes en la acumulación y persistencia de la nieve en invierno en cada parcela.

La temperatura del aire experimenta fuertes y rápidas variaciones tanto en invierno como en verano. La respuesta del suelo a esta variación térmica del aire es muy diferente en las distintas épocas del año. En verano las oscilaciones de la temperatura del aire se reflejan rápidamente en la temperatura del suelo que también presenta intensas y frecuentes variaciones. Estas oscilaciones de temperatura son más importantes en las capas superficiales que en las más internas.

En invierno, las oscilaciones de la temperatura del aire producen en el suelo efectos distintos en cada una de las parcelas. Hay ocasiones en las que las variaciones de la temperatura del aire no tienen consecuencias en las temperaturas del suelo. Así, por ejemplo, en la figura 32 se puede observar que en la temporada 2009 - 2010 hay episodios, como el que tuvo lugar entre los días 8 y 11 de marzo de 2010, en los que la temperatura del aire alcanza valores mínimos de $-11,6^{\circ}\text{C}$ y las temperaturas del suelo no sufren variaciones significativas y se mantienen entre $0,1$ y $0,6^{\circ}\text{C}$ en la parcela 1 y $0,2$ y $0,7^{\circ}\text{C}$ en la parcela 2. Este efecto tiene lugar con mayor frecuencia en los periodos centrales del invierno, coincidiendo con los momentos en los que el manto de nieve presenta los espesores más altos en ambas parcelas.

En otras ocasiones, también en invierno, las variaciones de la temperatura del aire producen claras oscilaciones en la temperatura del suelo en las parcelas de observación. Así, entre los días 14 y 16 de diciembre de 2009 (figura 32) tuvo lugar una bajada de las temperaturas del aire que llegaron a registrar valores de $-10,2$ y $-11,7^{\circ}\text{C}$ y, esos mismos días, las temperaturas del suelo en las parcelas de observación acusaron este descenso térmico registrando valores de $-3,4^{\circ}\text{C}$ (parcela 1) y $-1,4^{\circ}\text{C}$ (parcela 2) a 10 centímetros de profundidad.

La temperatura del aire suele registrar un ascenso rápido a finales de primavera. En todas las temporadas en las que existen datos de temperatura del aire se observa como a partir de mediados de mayo la temperatura del aire tiene una clara tendencia a crecer. Este ascenso se transmite al suelo cuyas temperaturas presentan, a partir de ese momento, también una tendencia al crecimiento. La respuesta del suelo a este aumento térmico es similar en las dos estaciones, pero se presenta antes (en torno a unos 15 días) en la parcela 1 que en la 2. Sólo

en dos temporadas, la 2001/2002 y la 2010/2011 (figuras 27 y 33) el ascenso de la temperatura del suelo se registra antes en la parcela 2 que en la 1.

La intensidad y rapidez en la transmisión de las oscilaciones de temperatura del aire al suelo es función de la profundidad. Así, las variaciones en la temperatura del aire se transmiten a la superficie del suelo y, posteriormente, a las capas más profundas de éste, de forma que existe un “tiempo de retardo” entre las variaciones térmicas en la superficie y en las capas internas del suelo. La existencia de este “tiempo de retardo” hace que las oscilaciones rápidas en la temperatura del aire (que duran uno o dos días) sólo tengan consecuencias en la superficie del suelo y en sus capas más externas, pero que apenas lleguen a afectar a las capas más profundas de éste.

Para ilustrar este efecto se ha considerado el episodio registrado en la zona de estudio entre los días 21 y 30 de mayo de 2002. En estos 10 días, se observaron dos entradas de masas frías en la Península que tuvieron como resultado dos episodios con temperaturas bajas separados por un leve ascenso de las temperaturas entre ellos.

En las figuras 34 y 35 aparecen, respectivamente, los datos de la temperatura del suelo de las dos estaciones de estudio y los mapas sinópticos correspondientes a los periodos del 21 al 29 de mayo de 2002.

	Parcela 1			Parcela 2		
	10 cm	15 cm	80 cm	10 cm	15 cm	80 cm
21/05/2002	8,6	7,6	6,1	11,5	10,5	7,9
22/05/2002	5,4	6,8	6,1	7,1	9,1	8,1
23/05/2002	1,6	4,2	5,1	2,9	5,6	6,8
24/05/2002	4,3	3,5	4,0	5,5	4,7	5,4
25/05/2002	5,9	5,2	4,5	8,0	7,1	5,8
26/05/2002	2,6	4,4	4,5	4,2	6,1	6,1
27/05/2002	1,9	3,1	3,8	3,6	4,5	5,3
28/05/2002	5,4	3,8	3,6	7,9	6,0	5,1
29/05/2002	9,9	6,1	4,6	11,9	8,8	6,3
30/05/2002	11,5	8,2	5,9	13,6	10,9	7,7

Figura 34: Temperaturas (°C) medias diarias de los días 21 a 30 de mayo de 2002 en las estaciones de estudio.

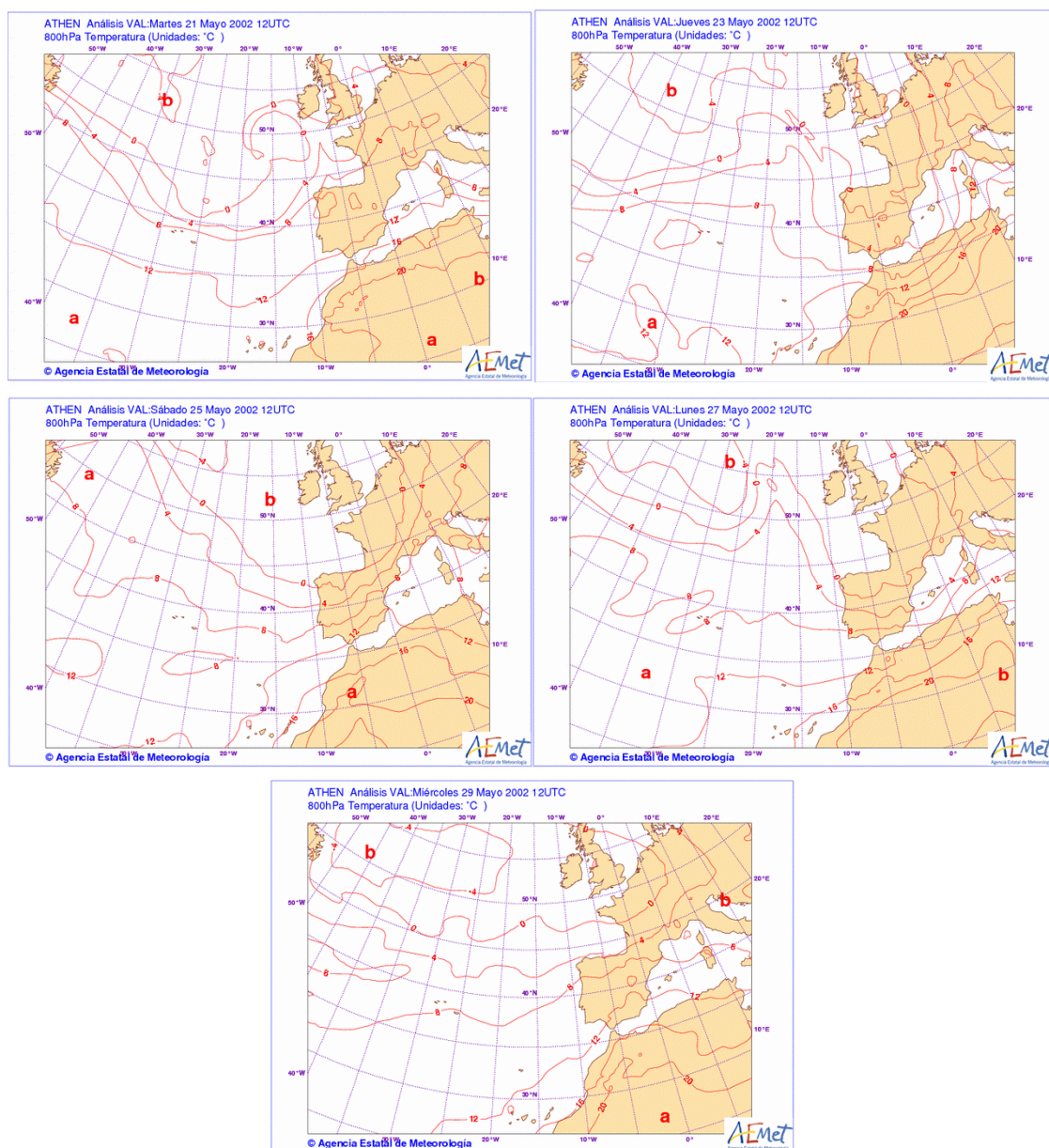


Figura 35: Mapas de temperatura en 800 hPa correspondientes a los días 21, 23, 25, 27 y 29 de mayo de 2002. Fuente: AEMET.

En los mapas sinópticos de la figura 35 se puede observar la entrada de una masa fría entre los días 21 y 23 de mayo. La temperatura del aire en 800 hPa (aproximadamente 2.000 metros de altitud) descendió en el centro de la Península en torno a 10°C. En el observatorio del Puerto de Navacerrada la temperatura máxima fue de 15°C el día 21 y de 5,5°C el día 23. Este descenso en la temperatura del aire se refleja claramente en las temperaturas del suelo tal y como se observa en los datos de la figura 34. En los 10 primeros centímetros la temperatura del suelo pasó de 8,6 a 1,6°C en la parcela 1 y de 11,5 a 2,9°C en la parcela 2 entre el 21 y el 23 de mayo. En las profundidades de 15 y 80 centímetros el descenso térmico fue menor y se produjo más tarde, alcanzándose el valor mínimo el día 24.

Después de esta entrada fría, las temperaturas del aire ascendieron hasta alcanzar 11,4°C el día 25. Este ascenso también se reflejó en las temperaturas de suelo que ascendieron en las dos parcelas aunque, con el retraso definido de forma que los valores máximos de temperatura se registraron un día más tarde a la profundidad de 80 centímetros que en las capas superiores. Además, el ascenso de temperatura observado en el suelo es menor cuanto mayor es la profundidad de medida.

Una segunda entrada fría tuvo lugar los días 26 y 27 (8°C de temperatura máxima del aire en el observatorio del Puerto de Navacerrada) y provocó un nuevo enfriamiento del suelo que siguió el mismo patrón de comportamiento, atenuándose el descenso térmico en el suelo conforme mayor era la profundidad de medida y con un retraso en el registro de los extremos de 1 día a 80 centímetros. Finalmente, el día 28 las temperaturas volvieron a ascender y, el día 29, la temperatura en el observatorio del Puerto de Navacerrada llegó a 18°C.

Este caso de estudio permite deducir que las variaciones de la temperatura del aire afectan al patrón térmico del suelo de forma diferente según sea la profundidad. A mayor profundidad menor es la variación de temperatura que se registra. Además, las variaciones en la temperatura del aire se transmiten al suelo con un cierto “tiempo de retardo”. Este tiempo de retardo es también una función creciente de la profundidad, de forma que una mayor profundidad de observación implica un mayor retraso en la llegada los valores mínimos al suelo.

A pesar de la proximidad de las dos parcelas de observación, en el episodio que nos ocupa, las oscilaciones térmicas ocurridas en el aire produjeron una respuesta más intensa en el suelo de la parcela 2 que en el de la parcela 1. Las variaciones de temperatura registradas fueron mayores, a todas las profundidades en la parcela 2 que en la 1.

4.3. Temperatura del suelo. Temperaturas media, media de las extremas y extremas absolutas mensuales.

En las figuras 36 a 42 aparecen los valores de la temperatura media mensual, la temperatura media mensual de las máximas y las mínimas y temperaturas máximas y mínimas absolutas a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros, para cada parcela y temporada.

TEMPORADA 2001 - 2002

Temperatura media mensual (°C)

Parcela 1

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre	5,5	6,2	6,4	6,6
Noviembre	-0,3	1,3	1,8	2,3
Diciembre	-3,7	-2,2	-1,6	-0,9
Enero	-0,8	-0,4	-0,3	-0,2
Febrero	-1,8	-1,2	-0,9	-0,6
Marzo	-0,6	-0,4	-0,3	-0,2
Abril	1,4	0,7	0,6	0,6
Mayo	4,1	3,8	3,6	3,4
Junio				
Julio				
Agosto				

Parcela 2

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre	7,6	7,8	7,8	7,8
Noviembre	1,4	2,6	3,1	3,6
Diciembre	0,0	1,1	1,4	1,7
Enero	-0,1	-0,1	0,1	0,2
Febrero	0,0	0,0	0,2	0,3
Marzo	2,0	1,7	1,6	1,4
Abril	4,3	3,8	3,5	3,2
Mayo	5,7	5,5	5,3	5,1
Junio				
Julio				
Agosto				

Temperatura media de las máximas (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre	7,2	6,7	6,7	6,8
Noviembre	0,3	1,5	2,0	2,4
Diciembre	-2,8	-1,9	-1,3	-0,7
Enero	-0,6	-0,4	-0,3	-0,2
Febrero	-1,0	-0,9	-0,7	-0,5
Marzo	-0,5	-0,3	-0,2	-0,2
Abril	3,4	1,0	0,9	0,7
Mayo	7,0	4,7	4,3	3,8
Junio				
Julio				
Agosto				

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre	10,9	8,9	8,5	8,0
Noviembre	2,7	3,1	3,4	3,8
Diciembre	2,3	1,6	1,7	1,8
Enero	0,0	-0,1	0,1	0,3
Febrero	0,7	0,1	0,2	0,3
Marzo	4,1	2,5	2,0	1,6
Abril	7,3	4,8	4,1	3,5
Mayo	9,0	6,9	6,3	5,6
Junio				
Julio				
Agosto				

Temperatura media de las mínimas (°C)

Temporada 2001 - 2002

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre	4,1	5,9	6,2	6,5
Noviembre	-0,8	1,2	1,7	2,2
Diciembre	-4,4	-2,5	-1,8	-1,0
Enero	-1,0	-0,5	-0,4	-0,2
Febrero	-2,6	-1,4	-1,1	-0,7
Marzo	-0,8	-0,4	-0,3	-0,2
Abril	-0,1	0,5	0,5	0,5
Mayo	1,9	3,2	3,2	3,2
Junio				
Julio				
Agosto				

Temporada 2001 - 2002

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre	5,1	7,0	7,3	7,6
Noviembre	0,5	2,2	2,8	3,4
Diciembre	-1,8	0,6	1,1	1,5
Enero	-0,3	-0,1	0,1	0,2
Febrero	-0,5	0,0	0,1	0,3
Marzo	0,4	1,2	1,2	1,3
Abril	2,0	3,0	3,0	3,1
Mayo	3,1	4,6	4,7	4,8
Junio				
Julio				
Agosto				

Temperatura máxima absoluta (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre	12,3	9,3	9,1	8,9
Noviembre	6,0	6,5	6,4	6,3
Diciembre	0,4	0,0	0,4	0,8
Enero	0,6	-0,1	-0,1	-0,1
Febrero	-0,3	-0,5	-0,4	-0,3
Marzo	-0,3	-0,1	-0,1	-0,1
Abril	14,7	7,0	5,7	4,4
Mayo	18,8	9,6	8,3	7,2
Junio				
Julio				
Agosto				

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre	19,9	13,6	12,2	11,1
Noviembre	14,1	10,7	9,9	9,1
Diciembre	10,1	5,9	5,2	4,4
Enero	1,7	0,0	0,2	0,4
Febrero	4,9	1,8	1,3	0,8
Marzo	16,0	9,0	7,2	5,8
Abril	20,8	12,8	10,7	8,7
Mayo	21,1	12,5	10,7	9,1
Junio				
Julio				
Agosto				

Temperatura mínima absoluta (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre	1,3	3,8	4,4	4,9
Noviembre	-2,8	-0,2	0,3	0,8
Diciembre	-9,7	-5,2	-4,2	-3,2
Enero	-2,3	-1,1	-0,7	-0,8
Febrero	-5,2	-2,9	-2,1	-1,4
Marzo	-2,1	-0,9	-0,6	-0,3
Abril	-2,8	-0,5	-0,3	-0,1
Mayo	-0,8	0,4	0,6	0,8
Junio				
Julio				
Agosto				

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre	1,5	3,8	4,5	5,1
Noviembre	-2,1	0,4	0,9	1,3
Diciembre	-5,9	-1,1	-0,5	0,1
Enero	-1,0	-0,1	0,0	0,1
Febrero	-2,5	-0,1	0,0	0,1
Marzo	-1,0	-0,1	0,0	0,1
Abril	-0,1	0,4	0,6	0,8
Mayo	0,4	1,1	1,4	1,7
Junio				
Julio				
Agosto				

Figura 36: Valores medios y extremos mensuales de la temperatura del suelo. Temporada 2001-2002.

TEMPORADA 2002 - 2003

Temperatura media mensual (°C)

Parcela 1

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	0,2	0,3	0,7	1,0
Enero	0,1	0,1	0,4	0,6
Febrero	0,1	0,2	0,4	0,6
Marzo	0,0	0,2	0,4	0,6
Abril	-0,1	0,1	0,3	0,5
Mayo	2,5	2,1	2,0	1,9
Junio	15,2	13,5	13,0	12,5
Julio	18,8	17,0	16,5	16,0
Agosto	17,6	16,9	16,7	16,5

Parcela 2

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	0,3	0,6	0,6	0,6
Enero	0,1	0,4	0,4	0,3
Febrero	0,1	0,6	0,5	0,4
Marzo	0,1	0,5	0,3	0,2
Abril	0,1	0,3	0,2	0,1
Mayo	-0,1	0,1	0,0	0,0
Junio	5,8	4,4	4,6	4,8
Julio	19,5	19,0	17,8	16,6
Agosto	19,0	18,8	18,4	17,9

Temperatura media de las máximas (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	0,2	0,4	0,7	1,1
Enero	0,1	0,2	0,4	0,6
Febrero	0,1	0,2	0,4	0,6
Marzo	0,0	0,2	0,4	0,6
Abril	-0,1	0,2	0,4	0,6
Mayo	4,4	2,9	2,6	2,3
Junio	21,7	15,3	14,3	13,3
Julio	27,5	19,1	18,0	16,8
Agosto	25,7	18,7	18,0	17,3

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	0,4	0,7	0,6	0,6
Enero	0,1	0,5	0,4	0,3
Febrero	0,1	0,6	0,5	0,4
Marzo	0,1	0,5	0,4	0,2
Abril	0,1	0,3	0,2	0,1
Mayo	-0,1	0,1	0,1	0,1
Junio	9,3	5,1	5,4	5,7
Julio	30,9	28,6	23,6	18,6
Agosto	27,2	26,1	22,8	19,5

Temperatura media de las mínimas (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	0,1	0,3	0,6	1,0
Enero	0,1	0,1	0,4	0,6
Febrero	0,1	0,2	0,4	0,6
Marzo	0,0	0,2	0,4	0,6
Abril	-0,1	0,1	0,3	0,5
Mayo	0,9	1,4	1,6	1,7
Junio	9,9	11,9	11,9	11,9
Julio	11,6	14,9	15,1	15,3
Agosto	11,9	15,1	15,5	15,9

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	0,3	0,6	0,6	0,5
Enero	0,1	0,4	0,3	0,3
Febrero	0,1	0,6	0,5	0,4
Marzo	0,1	0,4	0,3	0,2
Abril	0,1	0,3	0,2	0,1
Mayo	-0,1	0,1	0,0	-0,1
Junio	3,3	3,9	3,9	4,0
Julio	12,0	12,5	13,6	14,7
Agosto	13,4	13,8	15,0	16,3

Temperatura máxima absoluta (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	0,4	0,6	1,1	1,5
Enero	0,1	0,2	0,5	0,8
Febrero	0,1	0,2	0,5	0,8
Marzo	0,1	0,2	0,4	0,6
Abril	-0,1	0,2	0,4	0,6
Mayo	17,6	10,9	9,8	8,7
Junio	29,3	20,0	18,4	16,8
Julio	30,8	21,2	19,7	18,2
Agosto	32,4	21,2	19,9	18,8

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	0,6	1,2	1,1	1,0
Enero	0,4	0,8	0,7	0,6
Febrero	0,1	0,6	0,5	0,4
Marzo	0,1	0,6	0,5	0,4
Abril	0,1	0,3	0,2	0,1
Mayo	-0,1	0,1	0,1	0,1
Junio	31,2	15,7	16,9	18,2
Julio	36,1	34,0	27,7	21,4
Agosto	37,5	35,3	28,6	22,3

Temperatura mínima absoluta (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	-0,1	0,2	0,5	0,8
Enero	-0,1	0,0	0,3	0,4
Febrero	0,1	0,2	0,4	0,6
Marzo	-0,1	0,0	0,2	0,4
Abril	-0,1	0,0	0,2	0,4
Mayo	-0,3	0,0	0,2	0,4
Junio	5,1	7,5	7,6	7,5
Julio	6,5	10,7	11,3	11,8
Agosto	7,5	10,3	11,3	12,3

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Enero	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Febrero	0,1	0,6	0,5	0,4
Marzo	0,1	0,3	0,2	0,1
Abril	-0,1	0,1	0,1	0,1
Mayo	-0,1	0,1	0,0	-0,1
Junio	-0,1	0,1	0,0	-0,1
Julio	7,0	7,9	9,1	9,6
Agosto	8,7	9,1	10,1	11,1

Figura 37: Valores medios y extremos mensuales de la temperatura del suelo. Temporada 2002-2003.

TEMPORADA 2003 - 2004

Temperatura media mensual (°C)

Parcela 1

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre	1,0	1,6	2,0	2,4
Diciembre	-0,4	0,3	0,7	1,1
Enero	-0,2	0,0	0,3	0,6
Febrero	-0,2	0,1	0,3	0,5
Marzo	-0,2	0,0	0,2	0,4
Abril	-0,1	0,0	0,2	0,3
Mayo	-0,1	0,0	0,0	0,1
Junio	9,2	7,3	6,3	5,3
Julio	17,7	15,6	14,6	13,6
Agosto				

Parcela 2

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre	1,1	1,2	1,4	1,6
Diciembre	0,1	0,2	0,3	0,4
Enero	0,1	0,1	0,2	0,3
Febrero	0,0	0,0	0,0	0,1
Marzo	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Abril	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Mayo	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Junio	0,0	0,0	-0,1	-0,1
Julio				
Agosto				

Temperatura media de las máximas (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre	1,6	2,0	2,2	2,5
Diciembre	-0,3	0,3	0,7	1,1
Enero	-0,2	0,1	0,3	0,6
Febrero	-0,2	0,1	0,3	0,5
Marzo	-0,2	0,0	0,2	0,4
Abril	-0,1	0,0	0,2	0,3
Mayo	-0,1	0,0	0,1	0,1
Junio	13,9	8,8	7,3	5,7
Julio	25,6	18,0	16,0	14,0
Agosto				

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre	2,0	2,0	2,1	2,1
Diciembre	0,1	0,2	0,3	0,4
Enero	0,1	0,2	0,2	0,3
Febrero	0,0	0,0	0,1	0,1
Marzo	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Abril	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Mayo	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Junio	0,1	0,1	0,0	0,0
Julio				
Agosto				

Temperatura media de las mínimas (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre	0,5	1,3	1,8	2,4
Diciembre	-0,6	0,3	0,6	1,0
Enero	-0,2	0,0	0,3	0,6
Febrero	-0,3	0,1	0,3	0,5
Marzo	-0,2	0,0	0,2	0,4
Abril	-0,1	0,0	0,1	0,3
Mayo	-0,1	-0,1	0,0	0,1
Junio	5,2	5,8	5,4	5,1
Julio	11,2	13,3	13,3	13,3
Agosto				

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre	0,6	0,7	1,0	1,3
Diciembre	0,1	0,1	0,2	0,3
Enero	0,1	0,1	0,2	0,2
Febrero	-0,1	-0,1	0,0	0,0
Marzo	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Abril	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Mayo	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Junio	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Julio				
Agosto				

Temperatura máxima absoluta (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre	5,4	3,9	3,6	3,3
Diciembre	0,1	0,6	0,9	1,3
Enero	-0,1	0,2	0,4	0,6
Febrero	-0,1	0,2	0,4	0,6
Marzo	-0,1	0,1	0,3	0,4
Abril	-0,1	0,1	0,3	0,4
Mayo	-0,1	0,1	0,1	0,1
Junio	29,0	18,6	15,9	13,1
Julio	30,8	20,3	17,8	15,7
Agosto				

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre	7,5	7,1	6,1	5,1
Diciembre	0,4	0,4	0,5	0,6
Enero	0,1	0,2	0,3	0,4
Febrero	0,1	0,2	0,3	0,4
Marzo	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Abril	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Mayo	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Junio	4,2	4,0	3,4	2,8
Julio				
Agosto				

Temperatura mínima absoluta (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre	-0,1	0,4	0,8	1,3
Diciembre	-1,6	-0,2	0,2	0,6
Enero	-0,3	0,0	0,3	0,6
Febrero	-0,5	0,0	0,2	0,4
Marzo	-0,3	0,0	0,2	0,4
Abril	-0,1	-0,1	0,0	0,1
Mayo	-0,1	-0,1	0,0	0,1
Junio	-0,1	-0,1	0,0	0,1
Julio	4,0	7,5	8,9	10,3
Agosto				

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre	-0,1	-0,1	0,0	0,1
Diciembre	-0,1	-0,1	0,0	0,1
Enero	0,1	0,1	0,1	0,1
Febrero	-1,4	-1,2	-0,7	-0,1
Marzo	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1
Abril	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Mayo	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Junio	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Julio				
Agosto				

Figura 38: Valores medios y extremos mensuales de la temperatura del suelo. Temporada 2003-2004.

TEMPORADA 2005 - 2006

Temperatura media mensual (°C)

Parcela 1

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre	10,2	10,8	11,1	11,3
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	-0,2	0,1	0,6	1,1
Enero	-0,1	0,1	0,5	0,8
Febrero	-0,1	0,1	0,5	0,8
Marzo	-0,1	0,0	0,4	0,6
Abril	-0,1	0,0	0,2	0,3
Mayo	3,2	3,2	2,8	2,3
Junio	13,4	13,3	12,4	11,3
Julio	19,0	18,8	17,7	16,4
Agosto	16,1	16,0	15,7	15,3

Parcela 2

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre				
Enero				
Febrero				
Marzo				
Abril				
Mayo				
Junio				
Julio				
Agosto				

Temperatura media de las máximas (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre	13,9	12,1	11,9	11,7
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	-0,1	0,1	0,6	1,1
Enero	-0,1	0,1	0,5	0,8
Febrero	-0,1	0,1	0,5	0,8
Marzo	-0,1	0,1	0,4	0,7
Abril	-0,1	0,0	0,2	0,4
Mayo	5,6	5,1	3,9	2,8
Junio	19,4	18,1	15,0	12,2
Julio	26,0	24,4	20,7	17,4
Agosto	22,7	21,2	18,3	16,2

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre				
Enero				
Febrero				
Marzo				
Abril				
Mayo				
Junio				
Julio				
Agosto				

Temperatura media de las mínimas (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre	6,7	9,6	10,3	11,0
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	-0,2	0,0	0,6	1,1
Enero	-0,1	0,1	0,5	0,8
Febrero	-0,1	0,1	0,5	0,8
Marzo	-0,1	0,0	0,4	0,6
Abril	-0,1	0,0	0,2	0,3
Mayo	1,4	1,6	1,9	2,0
Junio	8,3	9,0	10,0	10,5
Julio	13,1	13,9	14,9	15,5
Agosto	10,8	11,7	13,3	14,4

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre				
Enero				
Febrero				
Marzo				
Abril				
Mayo				
Junio				
Julio				
Agosto				

Temperatura máxima absoluta (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre	22,9	17,8	16,9	16,0
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	-0,1	0,1	0,7	1,3
Enero	-0,1	0,1	0,5	1,0
Febrero	0,1	0,2	0,5	0,8
Marzo	-0,1	0,1	0,5	0,8
Abril	-0,1	0,0	0,3	0,6
Mayo	19,3	17,9	14,1	10,3
Junio	24,9	23,0	18,6	14,9
Julio	30,1	28,0	23,0	19,1
Agosto	27,9	25,7	21,8	18,8

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre				
Enero				
Febrero				
Marzo				
Abril				
Mayo				
Junio				
Julio				
Agosto				

Temperatura mínima absoluta (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre	0,8	5,8	7,1	8,4
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	-0,3	-0,1	0,4	0,8
Enero	-0,1	0,0	0,4	0,8
Febrero	-0,1	0,1	0,5	0,8
Marzo	-0,1	0,0	0,3	0,6
Abril	-0,3	-0,2	0,0	0,1
Mayo	-0,3	-0,2	0,0	0,1
Junio	3,1	4,2	6,2	7,5
Julio	9,9	10,7	12,4	13,4
Agosto	4,7	5,6	8,2	10,3

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre				
Enero				
Febrero				
Marzo				
Abril				
Mayo				
Junio				
Julio				
Agosto				

Figura 39: Valores medios y extremos mensuales de la temperatura del suelo. Temporada 2005-2006.

TEMPORADA 2007 - 2008

Temperatura media mensual (°C)

Parcela 1

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre				
Enero				
Febrero				
Marzo				
Abril				
Mayo				
Junio				
Julio				
Agosto				

Parcela 2

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	0,8	1,0	1,7	2,4
Enero	0,3	0,4	0,7	1,0
Febrero	0,2	0,3	0,5	0,8
Marzo	0,5	0,6	0,7	0,9
Abril	0,0	0,1	0,2	0,3
Mayo	-0,1	0,0	0,1	0,1
Junio	8,1	7,8	6,7	5,7
Julio	15,8	15,5	14,5	13,4
Agosto	17,2	17,0	16,4	15,8

Temperatura media de las máximas (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre				
Enero				
Febrero				
Marzo				
Abril				
Mayo				
Junio				
Julio				
Agosto				

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	1,1	1,3	1,9	2,5
Enero	0,3	0,4	0,7	1,1
Febrero	0,2	0,3	0,5	0,8
Marzo	1,1	1,0	1,0	0,9
Abril	0,1	0,1	0,2	0,3
Mayo	0,0	0,0	0,1	0,1
Junio	10,8	10,1	8,0	5,9
Julio	19,3	18,5	16,1	13,7
Agosto	20,7	20,0	18,0	16,0

Temperatura media de las mínimas (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre				
Enero				
Febrero				
Marzo				
Abril				
Mayo				
Junio				
Julio				
Agosto				

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	0,5	0,7	1,5	2,4
Enero	0,2	0,3	0,7	1,0
Febrero	0,2	0,3	0,5	0,7
Marzo	0,2	0,3	0,6	0,8
Abril	0,0	0,0	0,1	0,3
Mayo	-0,1	0,0	0,1	0,1
Junio	5,7	5,7	5,6	5,5
Julio	12,9	12,9	13,1	13,2
Agosto	14,4	14,5	15,0	15,6

Temperatura máxima absoluta (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre				
Enero				
Febrero				
Marzo				
Abril				
Mayo				
Junio				
Julio				
Agosto				

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	5,6	5,5	4,9	4,4
Enero	0,6	0,7	0,9	1,3
Febrero	0,2	0,3	0,5	0,8
Marzo	6,1	5,5	3,7	2,2
Abril	0,2	0,2	0,4	0,6
Mayo	0,2	0,2	0,3	0,4
Junio	20,9	19,7	16,3	12,9
Julio	22,4	21,3	18,3	15,7
Agosto	24,5	23,4	20,2	17,4

Temperatura mínima absoluta (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre				
Enero				
Febrero				
Marzo				
Abril				
Mayo				
Junio				
Julio				
Agosto				

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	-0,9	-0,5	0,8	1,3
Enero	-0,1	0,0	0,1	0,1
Febrero	0,2	0,2	0,4	0,6
Marzo	-0,6	-0,5	-0,2	0,1
Abril	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Mayo	-0,1	0,0	0,1	0,1
Junio	-0,1	0,0	0,1	0,1
Julio	8,1	8,5	9,8	11,1
Agosto	10,8	11,3	12,7	14,1

Figura 40: Valores medios y extremos mensuales de la temperatura del suelo. Temporada 2007-2008.

TEMPORADA 2009 - 2010

Temperatura media mensual (°C)

Parcela 1

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre	7,7	7,8	8,0	8,3
Noviembre	2,5	2,7	3,1	3,5
Diciembre	-0,1	0,0	0,4	0,7
Enero	0,1	0,2	0,3	0,5
Febrero	0,1	0,2	0,4	0,6
Marzo	0,1	0,2	0,4	0,6
Abril	0,2	0,2	0,4	0,5
Mayo	0,6	0,6	0,6	0,7
Junio	8,9	8,8	8,3	7,9
Julio	17,1	16,9	16,2	15,4
Agosto	16,9	16,8	16,4	16,1

Parcela 2

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre	8,9	9,0	9,3	9,6
Noviembre	2,5	2,7	3,4	4,1
Diciembre	-0,2	-0,1	0,4	0,9
Enero	0,0	0,1	0,4	0,6
Febrero	0,2	0,2	0,5	0,7
Marzo	0,2	0,3	0,5	0,7
Abril	0,2	0,2	0,4	0,6
Mayo				
Junio				
Julio	15,1	14,8	13,7	12,7
Agosto	16,1	16,0	15,9	15,7

Temperatura media de las máximas (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre	9,1	9,0	8,9	8,8
Noviembre	3,1	3,2	3,5	3,8
Diciembre	0,1	0,2	0,5	0,8
Enero	0,1	0,2	0,4	0,5
Febrero	0,1	0,2	0,4	0,6
Marzo	0,1	0,2	0,4	0,6
Abril	0,2	0,3	0,4	0,5
Mayo	0,9	0,9	0,9	0,8
Junio	10,9	10,6	9,6	8,6
Julio	20,0	19,4	17,9	16,3
Agosto	19,5	19,1	18,0	16,9

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre	11,1	11,0	10,6	10,2
Noviembre	3,7	3,8	4,2	4,5
Diciembre	0,0	0,1	0,5	1,0
Enero	0,0	0,1	0,4	0,6
Febrero	0,2	0,2	0,5	0,7
Marzo	0,2	0,3	0,5	0,7
Abril	0,2	0,3	0,4	0,6
Mayo				
Junio				
Julio	17,6	17,0	15,1	13,3
Agosto	18,4	18,1	17,2	16,2

Temperatura media de las mínimas (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre	6,5	6,7	7,3	7,9
Noviembre	2,1	2,3	2,8	3,3
Diciembre	-0,3	-0,2	0,2	0,6
Enero	0,1	0,2	0,3	0,5
Febrero	0,1	0,2	0,4	0,5
Marzo	0,1	0,2	0,4	0,5
Abril	0,1	0,2	0,3	0,5
Mayo	0,4	0,5	0,5	0,6
Junio	7,3	7,3	7,4	7,5
Julio	14,7	14,7	14,8	14,8
Agosto	14,6	14,7	15,1	15,5

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre	7,1	7,4	8,2	9,1
Noviembre	1,6	1,9	2,9	3,8
Diciembre	-0,4	-0,2	0,3	0,8
Enero	0,0	0,1	0,3	0,6
Febrero	0,1	0,2	0,4	0,7
Marzo	0,2	0,3	0,5	0,7
Abril	0,2	0,2	0,4	0,6
Mayo				
Junio				
Julio	12,9	12,8	12,5	12,2
Agosto	13,9	14,1	14,8	15,4

Temperatura máxima absoluta (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre	13,3	13,0	12,2	11,4
Noviembre	8,7	8,6	8,3	8,1
Diciembre	0,8	0,9	1,4	1,9
Enero	0,1	0,2	0,4	0,6
Febrero	0,1	0,2	0,4	0,6
Marzo	0,2	0,3	0,4	0,6
Abril	0,2	0,3	0,4	0,6
Mayo	9,7	9,2	7,6	6,1
Junio	15,4	14,9	13,4	11,9
Julio	23,5	22,8	20,7	18,6
Agosto	22,4	21,9	20,2	18,5

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre	14,1	13,8	13,0	12,4
Noviembre	11,2	11,1	10,7	10,4
Diciembre	0,7	0,8	1,1	1,9
Enero	0,1	0,2	0,4	0,7
Febrero	0,2	0,3	0,5	0,8
Marzo	0,3	0,4	0,5	0,7
Abril	0,2	0,3	0,5	0,7
Mayo				
Junio				
Julio	20,8	20,2	18,6	16,9
Agosto	20,9	20,4	18,9	17,6

Temperatura mínima absoluta (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre	2,6	2,9	3,7	4,5
Noviembre	0,7	0,8	1,4	1,9
Diciembre	-3,7	-3,3	-2,1	-0,9
Enero	0,1	0,1	0,2	0,2
Febrero	0,0	0,1	0,3	0,5
Marzo	0,1	0,2	0,3	0,5
Abril	0,1	0,2	0,3	0,5
Mayo	0,1	0,2	0,2	0,3
Junio	2,8	3,0	3,6	4,1
Julio	10,7	10,8	10,9	10,9
Agosto	12,1	12,3	12,9	13,5

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre	1,1	1,4	2,1	2,8
Noviembre	-0,3	0,0	0,9	1,9
Diciembre	-2,7	-2,3	-0,9	0,3
Enero	0,0	0,1	0,3	0,5
Febrero	0,0	0,1	0,4	0,7
Marzo	0,2	0,3	0,4	0,6
Abril	0,1	0,2	0,2	0,3
Mayo				
Junio				
Julio	5,8	5,2	3,4	1,5
Agosto	10,9	11,4	12,4	13,2

Figura 41: Valores medios y extremos mensuales de la temperatura del suelo. Temporada 2009-2010.

TEMPORADA 2010 - 2011

Temperatura media mensual (°C)

Parcela 1

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre	11,8	11,9	12,0	12,2
Octubre	5,6	5,7	6,1	6,5
Noviembre	1,2	1,4	1,8	2,2
Diciembre	0,1	0,2	0,5	0,7
Enero	0,2	0,3	0,4	0,6
Febrero	0,2	0,3	0,4	0,6
Marzo	0,2	0,3	0,4	0,6
Abril	0,2	0,3	0,3	0,4
Mayo	4,5	4,4	4,1	3,7
Junio	12,1	11,9	11,3	10,7
Julio	15,9	15,7	15,3	14,8
Agosto	16,5	16,4	16,0	15,7

Parcela 2

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre	11,9	12,1	12,5	13,0
Octubre	6,7	7,0	7,7	8,3
Noviembre	1,0	1,1	1,6	2,0
Diciembre	0,4	0,5	0,7	0,9
Enero	0,4	0,5	0,6	0,8
Febrero	0,3	0,3	0,5	0,6
Marzo	0,3	0,4	0,5	0,6
Abril	0,3	0,3	0,3	0,3
Mayo	6,8	6,7	6,3	5,9
Junio	12,1	12,0	11,7	11,4
Julio	15,4	15,4	15,4	15,4
Agosto	16,3	16,4	16,6	16,7

Temperatura media de las máximas (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre	14,1	13,9	13,4	13,0
Octubre	6,9	6,9	6,9	6,9
Noviembre	1,3	1,4	1,8	2,2
Diciembre	0,2	0,3	0,5	0,8
Enero	0,2	0,3	0,4	0,6
Febrero	0,2	0,3	0,4	0,6
Marzo	0,2	0,3	0,4	0,6
Abril	0,2	0,3	0,4	0,4
Mayo	5,7	5,4	4,8	4,1
Junio	15,0	14,5	13,0	11,6
Julio	19,1	18,7	17,2	15,8
Agosto	19,7	19,2	17,9	16,6

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre	14,3	14,2	13,9	13,6
Octubre	9,0	9,0	9,0	9,0
Noviembre	1,3	1,4	1,8	2,2
Diciembre	0,5	0,5	0,8	1,0
Enero	0,4	0,5	0,6	0,8
Febrero	0,3	0,3	0,5	0,6
Marzo	0,4	0,4	0,5	0,6
Abril	0,3	0,3	0,3	0,3
Mayo	8,5	8,2	7,3	6,4
Junio	14,5	14,1	13,0	11,9
Julio	18,2	17,9	16,9	15,9
Agosto	19,2	18,9	18,1	17,3

Temperatura media de las mínimas (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre	10,0	10,2	10,9	11,6
Octubre	4,5	4,7	5,4	6,1
Noviembre	1,2	1,3	1,7	2,1
Diciembre	0,0	0,1	0,4	0,7
Enero	0,2	0,3	0,4	0,6
Febrero	0,1	0,2	0,4	0,6
Marzo	0,2	0,3	0,4	0,6
Abril	0,2	0,3	0,3	0,4
Mayo	3,5	3,5	3,5	3,5
Junio	9,5	9,6	9,9	10,1
Julio	13,0	13,2	13,7	14,2
Agosto	13,7	13,9	14,4	15,0

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre	9,9	10,3	11,4	12,5
Octubre	4,9	5,3	6,6	7,8
Noviembre	0,7	0,9	1,3	1,8
Diciembre	0,4	0,5	0,7	0,9
Enero	0,4	0,4	0,6	0,7
Febrero	0,3	0,3	0,5	0,6
Marzo	0,3	0,4	0,5	0,6
Abril	0,2	0,2	0,3	0,3
Mayo	5,3	5,3	5,5	5,7
Junio	9,9	10,1	10,6	11,1
Julio	12,9	13,2	14,1	15,1
Agosto	13,9	14,3	15,3	16,3

Temperatura máxima absoluta (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre	19,0	18,5	17,6	17,0
Octubre	12,0	11,8	11,1	10,4
Noviembre	2,4	2,6	3,3	3,9
Diciembre	0,5	0,6	1,0	1,3
Enero	0,2	0,3	0,4	0,6
Febrero	0,2	0,3	0,4	0,6
Marzo	0,2	0,3	0,4	0,6
Abril	0,2	0,3	0,4	0,6
Mayo	13,8	13,1	11,0	9,0
Junio	22,5	21,7	19,4	17,1
Julio	22,2	21,5	19,4	17,2
Agosto	22,9	22,2	20,2	18,2

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre	19,7	19,4	18,6	17,8
Octubre	14,5	14,3	13,5	12,8
Noviembre	5,1	4,9	4,2	4,9
Diciembre	0,6	0,7	1,1	1,4
Enero	0,6	0,6	0,8	1,0
Febrero	0,3	0,4	0,5	0,7
Marzo	0,5	0,5	0,6	0,7
Abril	0,3	0,4	0,5	0,6
Mayo	14,1	13,5	11,6	10,3
Junio	21,1	20,5	18,6	17,0
Julio	21,7	21,1	19,3	17,6
Agosto	22,4	21,8	20,2	19,2

Temperatura mínima absoluta (°C)

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre	5,5	5,8	6,8	7,9
Octubre	2,3	2,5	3,2	3,9
Noviembre	0,2	0,4	0,8	1,2
Diciembre	-1,5	-1,2	-0,6	0,1
Enero	0,1	0,2	0,4	0,6
Febrero	0,1	0,2	0,4	0,6
Marzo	0,2	0,3	0,4	0,6
Abril	0,2	0,2	0,3	0,3
Mayo	0,2	0,2	0,3	0,3
Junio	4,6	4,9	5,7	6,2
Julio	8,8	9,1	10,2	11,3
Agosto	7,3	7,9	9,7	11,5

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre	4,7	5,3	7,2	9,1
Octubre	2,1	2,5	3,7	4,9
Noviembre	-0,1	0,2	0,8	1,1
Diciembre	0,2	0,2	0,2	0,2
Enero	0,1	0,2	0,4	0,5
Febrero	0,1	0,2	0,4	0,6
Marzo	0,3	0,4	0,5	0,6
Abril	0,1	0,1	0,2	0,2
Mayo	0,2	0,2	0,2	0,2
Junio	4,1	4,6	5,9	6,8
Julio	8,3	8,8	10,5	12,1
Agosto	7,5	8,3	10,8	13,3

Figura 42: Valores medios y extremos mensuales de la temperatura del suelo. Temporada 2010-2011.

Las temperaturas más altas se observan en ambas parcelas entre los meses de julio y agosto. En la parcela 1 el valor máximo de temperatura media se registró en el mes de julio de 2006 (figura 39) a las profundidades de 10, 20 y 50 centímetros (19, 18,8 y 17,7°C respectivamente) y en agosto de 2003 (figura 37) a 80 centímetros (16,5°C). En la parcela 2 el valor máximo de temperatura media mensual se registró en julio de 2003 a las profundidades de 10 y 20 centímetros (19,5 y 19°C) y en agosto de ese mismo año a las profundidades de 50 y 80 centímetros (18,4 y 17,9°C) (figura 37). En las dos parcelas las temperaturas medias más altas se observan en superficie y estos valores máximos disminuyen conforme aumentamos la profundidad.

En la tabla de la figura 43 se presenta la diferencia entre las temperaturas medias mensuales y estacionales de todas las temporadas para las dos parcelas de observación.

$T_{\text{media}} (P1) - T_{\text{media}} (P2)$				
	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre	-0,6	-0,7	-1,1	-1,4
Octubre	-1,5	-1,3	-1,4	-1,4
Noviembre	-0,6	-0,3	-0,3	-0,4
Diciembre	-0,8	-0,6	-0,5	-0,4
Enero	-0,2	-0,2	-0,1	0,0
Febrero	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1
Marzo	-0,6	-0,5	-0,4	-0,2
Abril	-0,6	-0,6	-0,5	-0,4
Mayo	-0,3	-0,5	-0,5	-0,4
Junio	6,2	5,4	4,8	4,1
Julio	0,6	0,2	0,4	0,5
Agosto	-0,1	-0,4	-0,5	-0,7

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Otoño	-0,9	-0,8	-0,9	-1,1
Invierno	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2
Primavera	-0,5	-0,6	-0,4	-0,3
Verano	2,2	1,7	1,5	1,3
Año	0,1	0,0	0,0	-0,1

Figura 43: Diferencia entre los valores de temperatura media mensual y estacional de las dos parcelas de observación.

La parcela 2 presenta valores de temperatura media superiores a la parcela 1 entre los meses de agosto y mayo. En octubre esta diferencia es máxima y supera 1°C en todas las profundidades. Así, parece que el suelo de la parcela 1 se “enfría” rápidamente en el mes de septiembre y, sobre todo, en el de octubre y, sin embargo, la parcela 2 permanece “caliente”. A partir de enero las temperaturas de ambas parcelas son muy similares, aunque la temperatura de la parcela 2 es siempre, y a todas las profundidades, superior que en la 1. En el mes de junio esta situación se invierte y la temperatura media de la parcela 1 supera a la de la parcela 2, como se puede observar en las temporadas 2002 - 2003 y 2003 - 2004 (figuras 37 y 38). En concreto, en la temporada 2002 - 2003, mientras las temperaturas del suelo en la parcela 2 se mantienen por debajo de 10°C, las de la parcela 1 superan ese valor a

todas las profundidades (ver figura 37). Este comportamiento no es común a todas las temporadas ya que otras, como la 2010 - 2011, la temperatura media del suelo es muy similar en las dos parcelas (ver figura 42).

En julio la parcela 1 se mantiene más “cálida” que la 2 aunque la diferencia de temperatura media entre ambas parcelas no supera 0,6°C.

Las diferencias más significativas entre las dos parcelas se observan en invierno. En la parcela 1, los valores mínimos de temperatura media, temperatura media de las mínimas y temperatura mínima absoluta se registran en diciembre o enero para las profundidades de 10 y 20 centímetros mientras que, para profundidades superiores, es frecuente que estos valores mínimos se retrasen hasta el mes de abril. En la parcela 2 los valores más bajos de temperatura media suelen retrasarse con respecto a la parcela 1. Así, las temporadas 2001 - 2002, 2002- 2003 y 2010 - 2011 (figuras 36, 37 y 42) los valores mínimos de temperatura media se registraron al menos un mes antes en la parcela 1 que en la 2. En las dos parcelas, los valores mínimos se observan en superficie y la temperatura media mensual aumenta con la profundidad.

En la parcela 1, la temperatura media mensual toma valores negativos todas las temporadas salvo la 2010 - 2011. Los valores negativos de temperatura media mensual son más frecuentes y menores en las capas superiores (10 centímetros) más afectadas por la temperatura del aire, que en las capas más internas, en las que la inercia térmica del suelo impide los cambios rápidos e intensos de temperatura. El valor más bajo de temperatura del suelo en la parcela 1 se registró en diciembre de 2001 (-3,7°C a 10 centímetros, -2,2°C a 20 centímetros, -1,6°C a 50 centímetros y -0,9°C a 80 centímetros) (figura 36).

En la parcela 2 el número de meses con la temperatura media mensual negativa es menor y, en los casos en los que se registra, el valor de esta temperatura no es inferior a -0,2°C. En la parcela 2 la temperatura media a la profundidad de 80 centímetros sólo ha sido negativa en la temporada 2003 - 2004, aunque es significativo que, una vez que la temperatura descendió en marzo hasta -0,1°C, se mantuvo así hasta el mes de junio (figura 38).

Al igual que se ha señalado en los datos medios diarios, los valores extremos mensuales también se presentan con un cierto tiempo de retardo en las capas más profundas respecto a las superiores. Así, el calor no se transmite hacia el interior del suelo de forma instantánea, sino que tarda cierto tiempo en penetrar en éste, por lo que las capas más internas tardan un lapso de tiempo en modificar su temperatura y, por tanto, alcanzan los valores extremos con un cierto retardo con respecto a las capas superiores. En concreto, en la parcela 1, este comportamiento queda claramente ilustrado en las temporadas 2003 - 2004, 2005 - 2006 o 2009 - 2010 (figuras 38, 39 y 41) en las que los valores mínimos de la temperatura media y media de las mínimas se registran antes en las capas superiores del suelo que en los niveles más profundos de éste. Sin embargo, la cuantificación de este retardo no es sencilla, ya que no presenta un patrón uniforme de unos años a otros.

En resumen, la parcela 1 presenta un patrón térmico más extremo que la parcela 2 con temperaturas mínimas más bajas en invierno y temperaturas máximas más elevadas en verano y con un mayor número de meses con temperaturas negativas. Este comportamiento puede explicarse teniendo en cuenta que la parcela 2 registra un manto de nieve más espeso y duradero que la parcela 1 y que este manto ejerce un efecto de aislante térmico. En temporadas con diferencias en la innivación en las dos parcelas, el suelo de la parcela 1 se acusa rápidamente las variaciones de la temperatura del aire, mientras que en la parcela 2 el suelo se encuentra protegido por la nieve y se mantiene sensiblemente constante frente a esas variaciones.

4.4. Temperatura del suelo. Variación vertical de la temperatura media estacional.

En las figuras 44 a 50 se representa por temporadas la variación vertical de las temperaturas medias estacionales en cada una de las parcelas de observación.

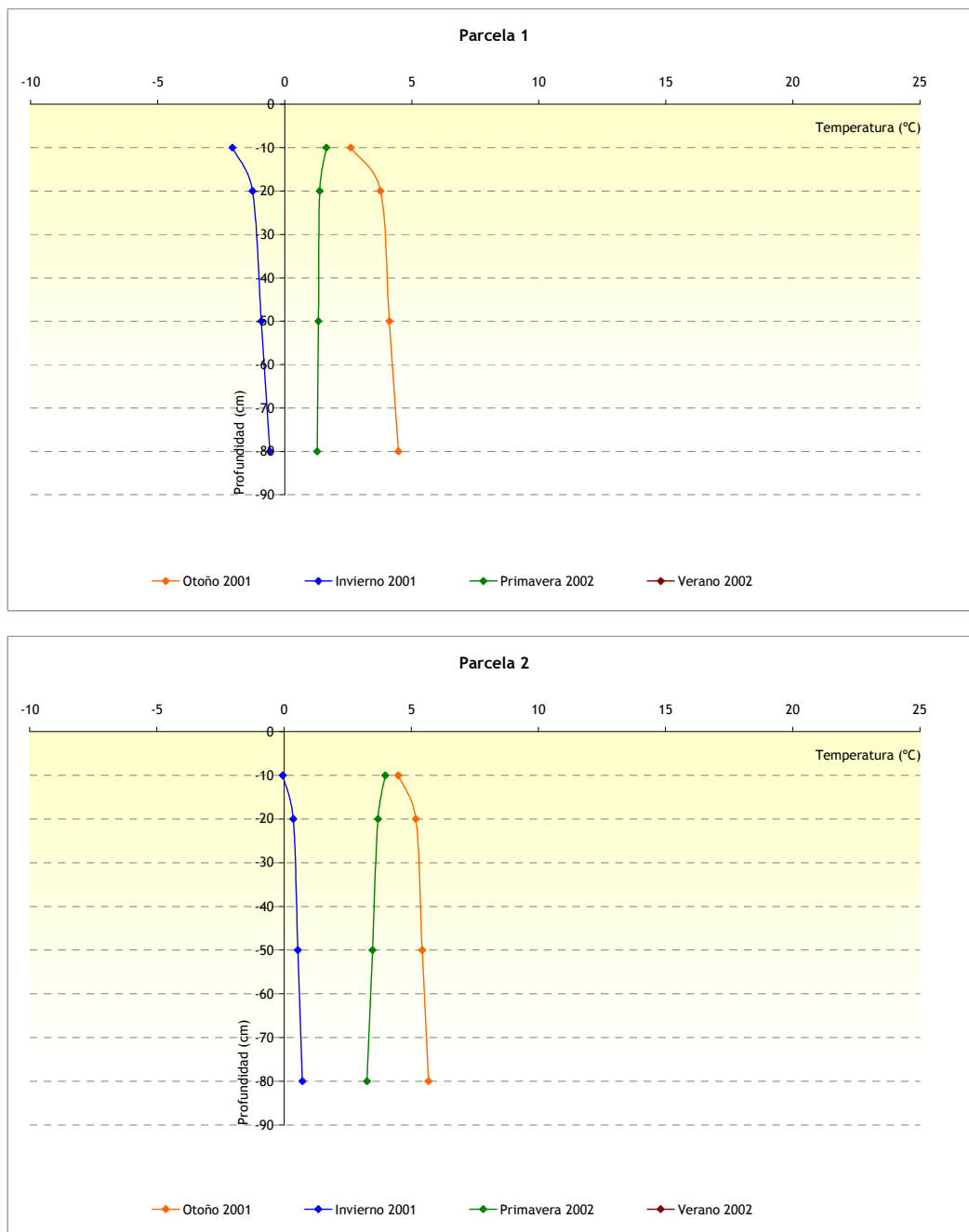


Figura 44: Variación vertical de las temperaturas medias estacionales. Temporada 2001 - 2002.

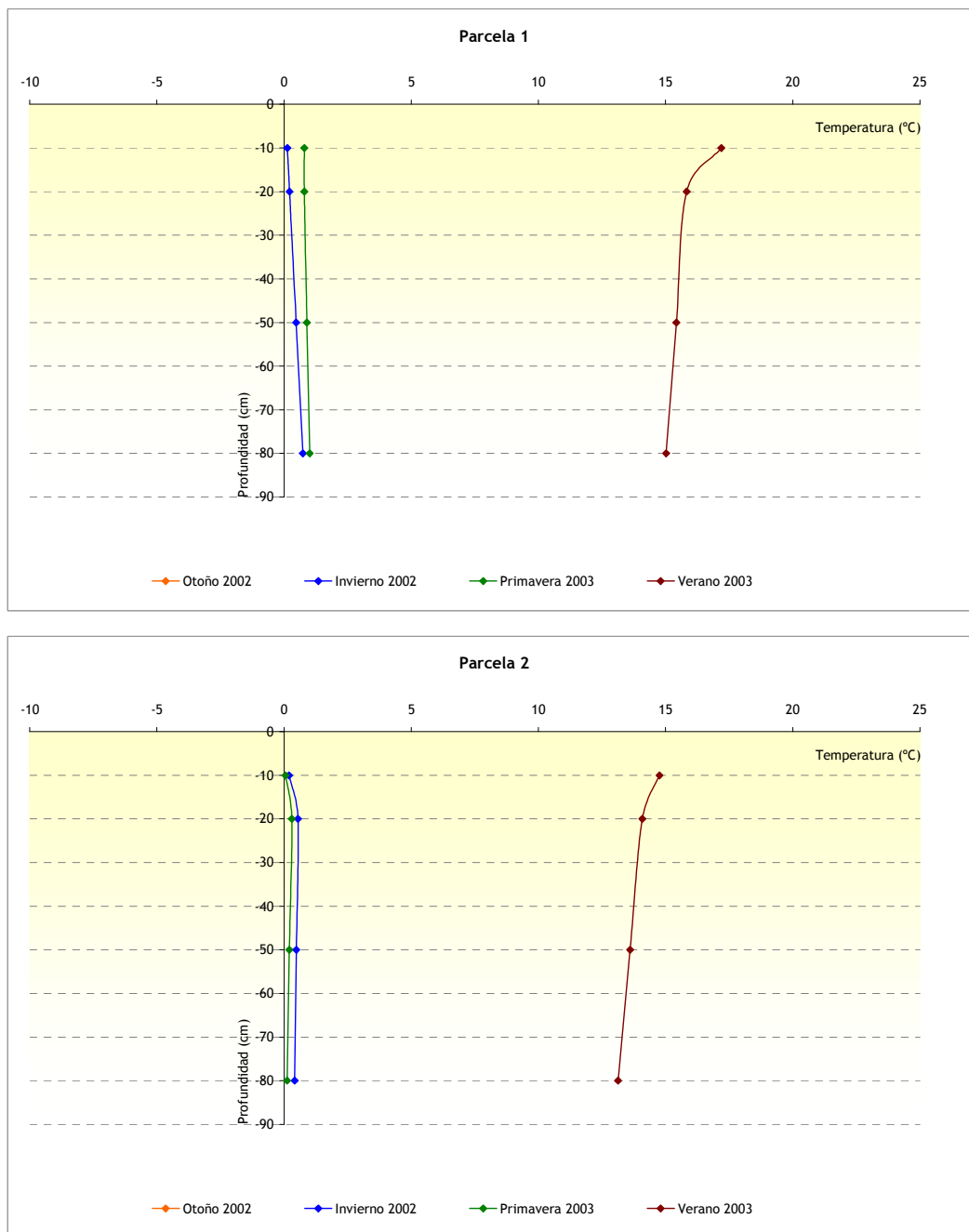


Figura 45: Variación vertical de las temperaturas medias estacionales. Temporada 2002 - 2003.

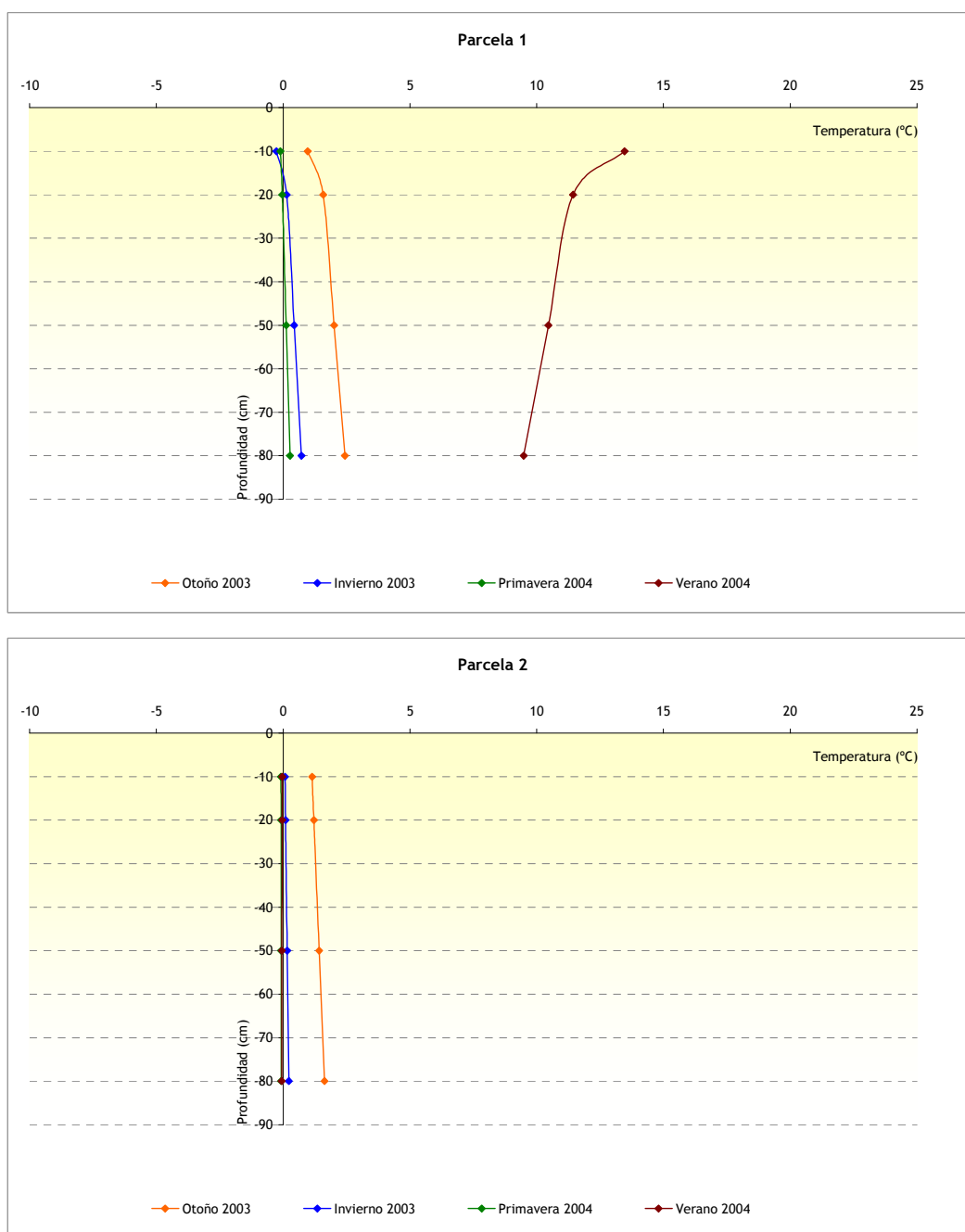


Figura 46: Variación vertical de las temperaturas medias estacionales. Temporada 2003 - 2004.

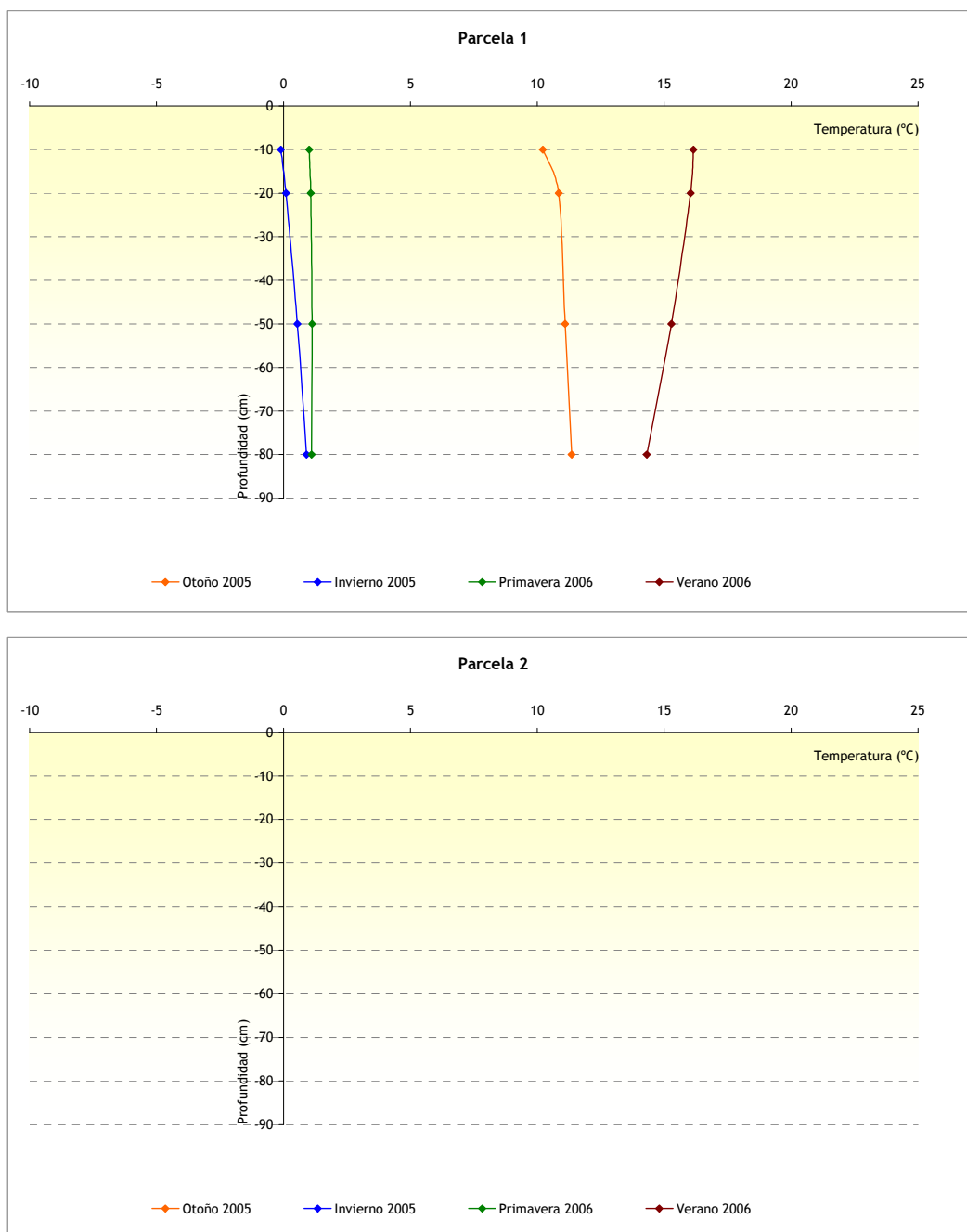


Figura 47: Variación vertical de las temperaturas medias estacionales. Temporada 2005 - 2006.

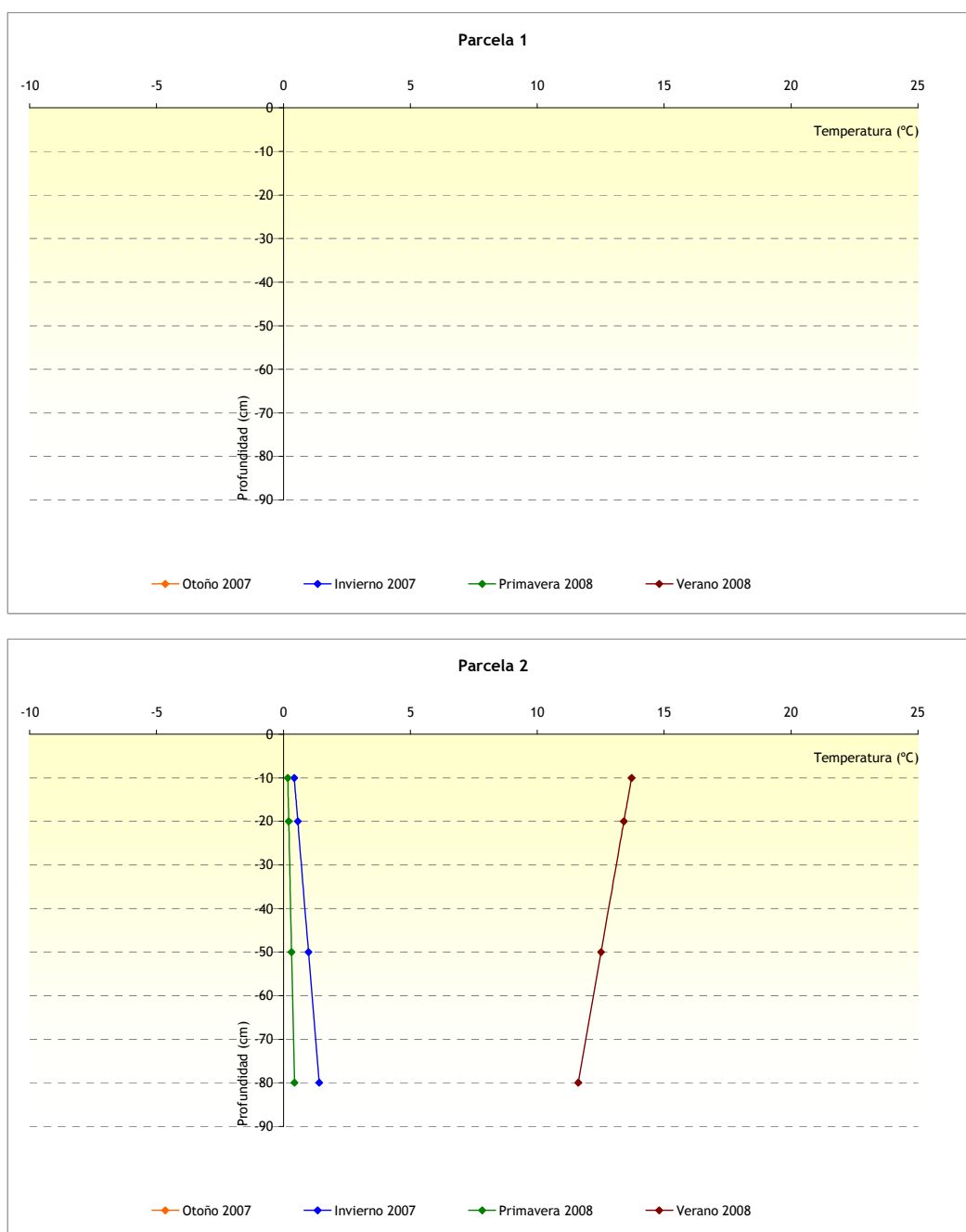


Figura 48: Variación vertical de las temperaturas medias estacionales. Temporada 2007 - 2008.

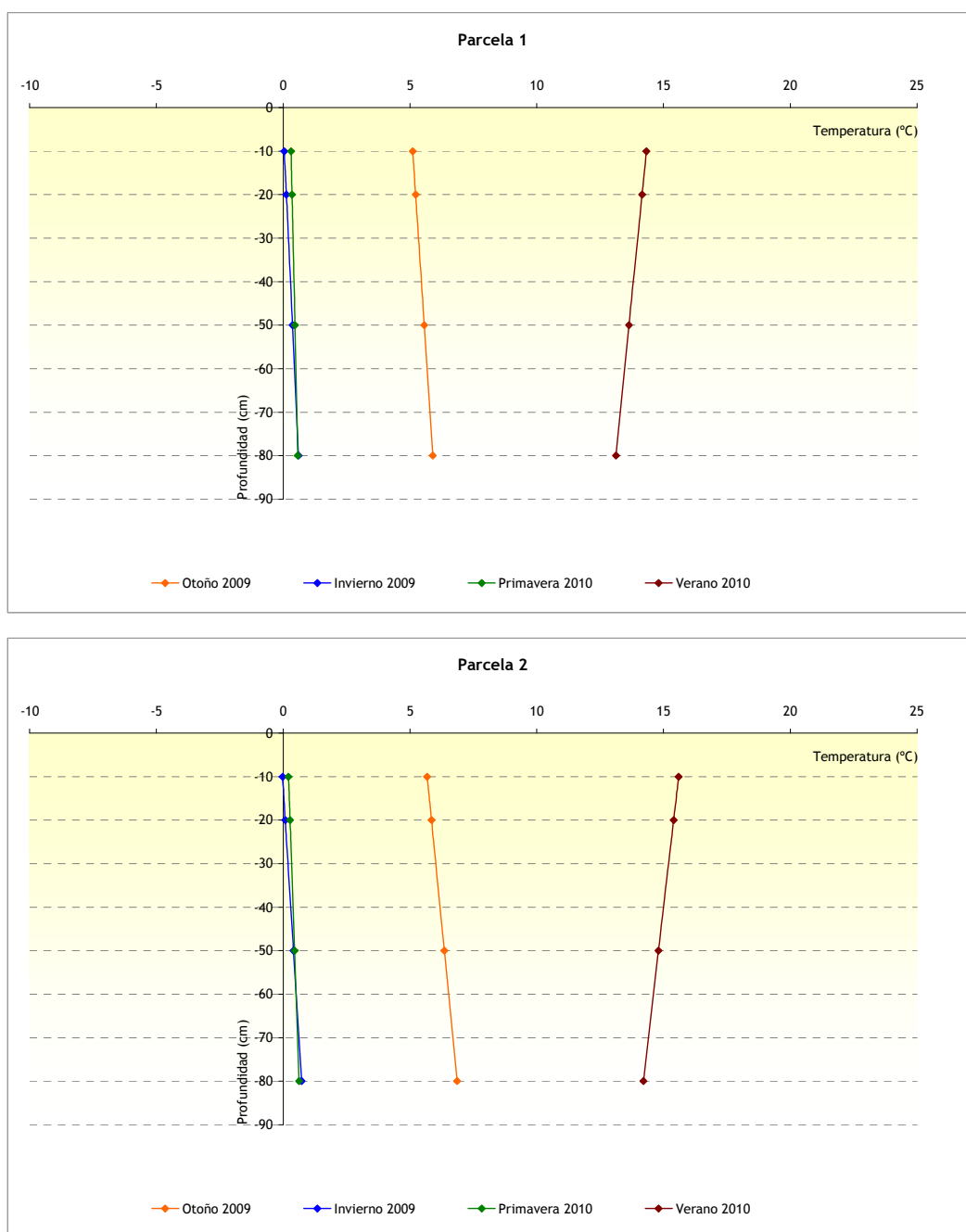


Figura 49: Variación vertical de las temperaturas medias estacionales. Temporada 2009 - 2010.

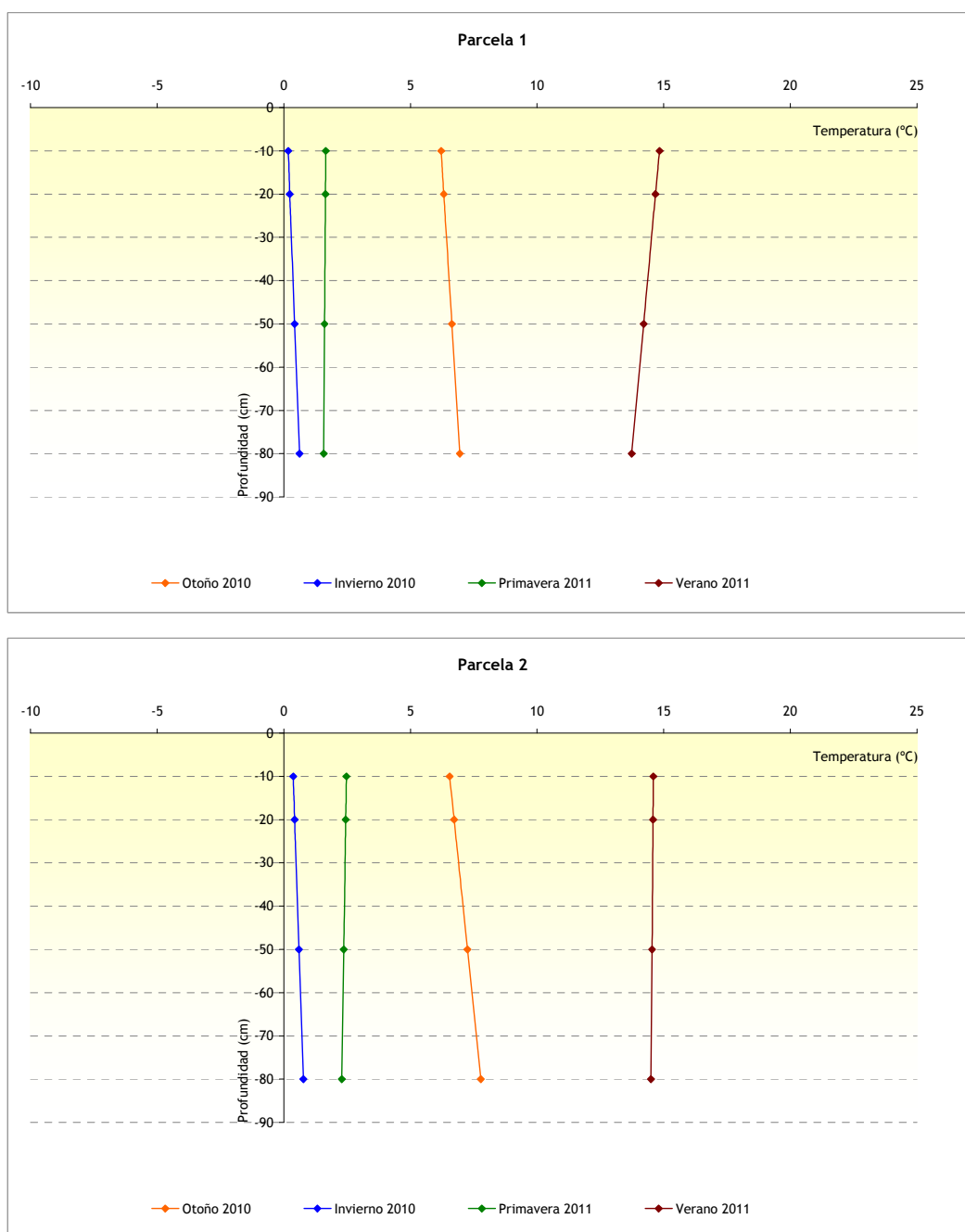


Figura 50: Variación vertical de las temperaturas medias estacionales. Temporada 2010 - 2011.

En las gráficas anteriores se aprecia una marcada linealidad en la distribución vertical de la temperatura de algunas temporadas (figuras 46, 48, 49 y 50). Este comportamiento es el resultado de la interpolación realizada para la estimación de las temperaturas a las profundidades definidas. En las temporadas en las que sólo se dispone de información de dos profundidades la interpolación presenta un carácter lineal.

En términos generales, se puede afirmar que la temperatura media mensual aumenta con la profundidad en invierno y otoño y decrece con ella en verano y que esta variación con la profundidad es más rápida en las capas superficiales que en las más internas. Así, en otoño e

invierno se registra un aumento de la temperatura conforme aumenta la profundidad en todas las temporadas, y este aumento es más rápido entre 10 y 20 centímetros de profundidad que entre 20 y 80. De la misma manera, en verano la disminución de temperatura es más intensa entre los niveles superficiales (10 y 20 centímetros) que en las capas más profundas. En primavera, la temperatura aumenta con la profundidad salvo dos temporadas, 2001/2002 y 2010/2011, (figuras 44 y 50) en las que experimenta un leve decrecimiento con ella.

Todos estos resultados también son aplicables a la figura 51 en la que se representa la variación vertical de las temperaturas medias estacionales del suelo y del aire en las dos parcelas de observación, así como la variación media anual.

En términos medios anuales, la temperatura es prácticamente constante en el suelo registrando sólo diferencias de 0,1°C entre la superficie y las capas más profundas.

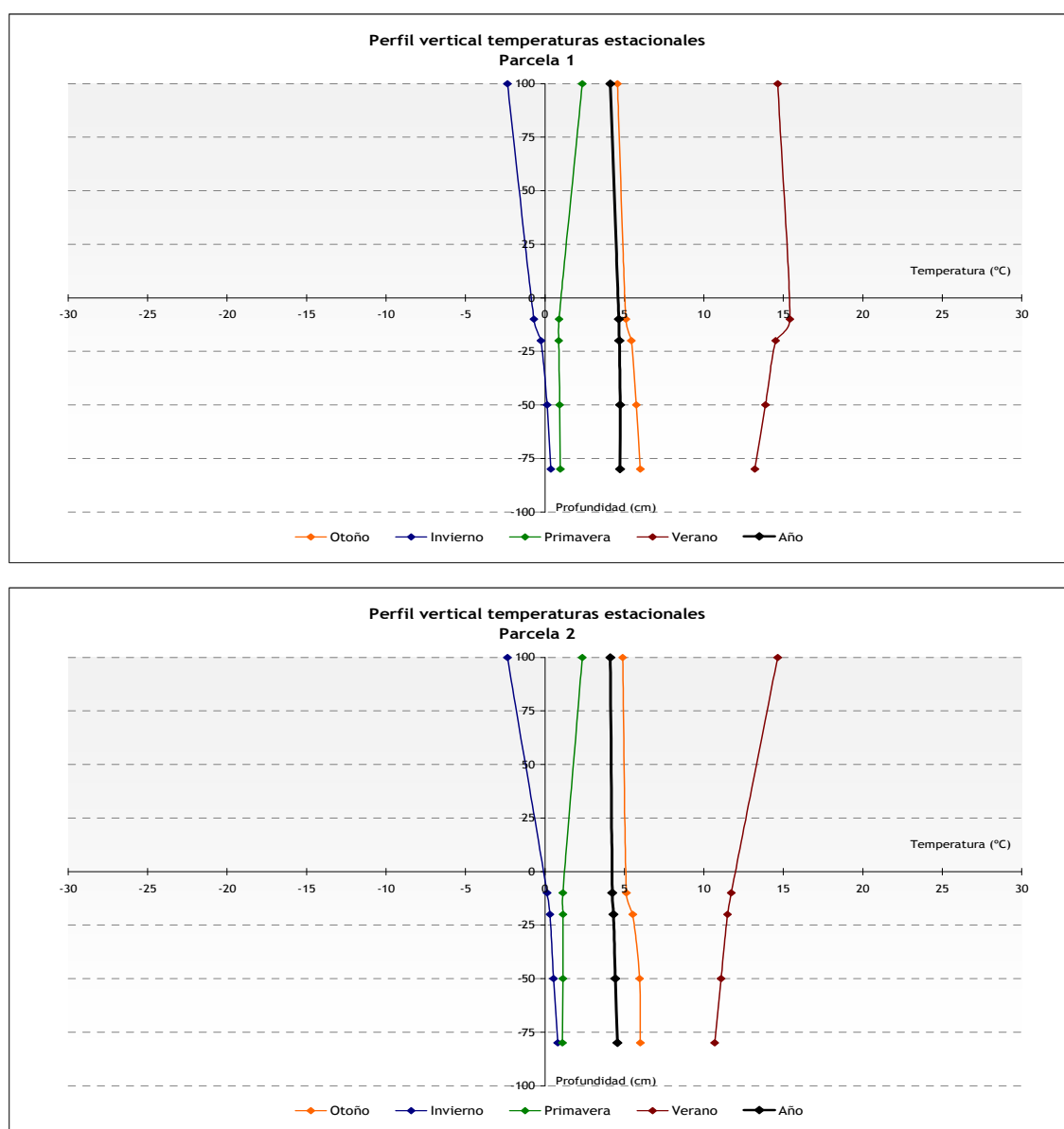


Figura 51: Variación vertical de las temperaturas medias estacionales.

4.5. Temperatura de suelo. Gradiente vertical de temperatura del suelo.

Para cuantificar la intensidad de la variación de la temperatura con la profundidad se ha definido el gradiente vertical de temperatura tal y como se expone en la ecuación

$$\text{Grad } T = (T_{\text{prof2}} - T_{\text{prof1}}) / (\text{prof2} - \text{prof1})$$

Se ha calculado los siguientes gradientes verticales:

- Grad $T_{10/20}$: $(T_{20} - T_{10})/0,1$: Gradiente de temperatura entre 10 y 20 centímetros (°C/m).
- Grad $T_{20/50}$: $(T_{50} - T_{20})/0,3$: Gradiente de temperatura entre 20 y 50 centímetros (°C/m).
- Grad $T_{50/80}$: $(T_{80} - T_{50})/0,3$: Gradiente de temperatura entre 50 y 80 centímetros (°C/m).
- Gradiente vertical medio: $(\text{Grad } T_{10/20} + \text{Grad } T_{20/50} + \text{Grad } T_{50/80})/3$ (°C/m).

Con esta definición, cuando la temperatura aumenta con la profundidad el gradiente es positivo y cuando la temperatura disminuye con la profundidad es negativo. El valor absoluto del gradiente nos permite conocer la velocidad de la variación de la temperatura con la profundidad.

En la figura 52 aparecen, resumidos, los valores del gradiente de temperatura por estaciones y temporadas para las dos parcelas de observación.

		Parcela 1				Parcela 2			
		10/20 cm	20/50 cm	50/80 cm	10/80 cm	10/20 cm	20/50 cm	50/80 cm	10/80 cm
2001 - 2002	Otoño	11,7	1,2	1,2	4,7	6,9	0,8	0,8	2,8
	Invierno	8,0	1,1	1,1	3,4	4,1	0,6	0,6	1,8
	Primavera	-2,6	-0,2	-0,2	-1,0	-2,9	-0,7	-0,7	-1,4
	Verano								
2002 - 2003	Otoño								
	Invierno	0,8	0,9	0,9	0,8	3,6	-0,2	-0,2	1,0
	Primavera	0,0	0,3	0,3	0,2	2,5	-0,3	-0,3	0,6
	Verano	-13,7	-1,3	-1,3	-5,5	-6,8	-1,6	-1,6	-3,3
2003 - 2004	Otoño	6,1	1,4	1,4	3,0	0,7	0,7	0,7	0,7
	Invierno	4,1	1,0	1,0	2,0	0,2	0,2	0,2	0,2
	Primavera	0,8	0,5	0,5	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0
	Verano								
2005 - 2006	Otoño	6,2	0,9	0,9	2,7				
	Invierno	2,0	1,5	1,2	1,6				
	Primavera	0,6	0,2	-0,1	0,2				
	Verano	-1,1	-2,5	-3,2	-2,3				
2007 - 2008	Otoño								
	Invierno					1,4	1,4	1,4	1,4
	Primavera					0,4	0,4	0,4	0,4
	Verano					-3,0	-3,0	-3,0	-3,0
2009 - 2010	Otoño	1,1	1,1	1,1	1,1	1,7	1,7	1,7	1,7
	Invierno	0,8	0,8	0,8	0,8	1,1	1,1	1,1	1,1
	Primavera	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6
	Verano	-1,7	-1,7	-1,7	-1,7	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0
2010 - 2011	Otoño	1,1	1,1	1,1	1,1	1,8	1,8	1,8	1,8
	Invierno	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	Primavera	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3
	Verano	-1,6	-1,6	-1,6	-1,6	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1

Figura 52: Gradientes verticales de temperatura por estaciones y temporadas.

El gradiente de temperatura presenta un valor absoluto máximo en las capas superficiales, entre 10 y 20 centímetros de profundidad (figura 52). Esto significa que la variación de temperatura se produce rápidamente en las capas superficiales y de forma más lenta en las capas más internas. Este es un resultado lógico si consideramos que las capas más externas del suelo se ven mucho más afectadas por las variaciones térmicas del aire.

Los casos en los que el gradiente vertical de temperatura es constante con la profundidad (Temporadas 2009 - 2010 y 2010 - 2011 en la parcela 1 y 2003 - 2004 y 2007 a 2011 en la parcela 2) son el resultado de la realización de una interpolación lineal para estimar los valores de temperatura a las profundidades de 20 y 50 centímetros y, por lo tanto, no se puede obtener de ellos resultados concluyentes.

En verano el gradiente es negativo y tiene un valor absoluto elevado. La temperatura media mensual es máxima en superficie y disminuye rápidamente conforme nos internamos en el suelo. Además, esta disminución es muy rápida en la capa superficial y más lenta en las más internas. El valor mínimo del gradiente se registra en verano en ambas estaciones. El caso extremo de este comportamiento se puede observar en la temporada 2002 - 2003 en la parcela 1. En el verano de esa temporada la disminución de temperatura con la profundidad fue de 13,7°C/m en las capas superficiales. Como media, ese verano, la temperatura media del suelo disminuyó 5,5°C en cada metro de profundidad.

En otoño, la disminución de la intensidad de la radiación solar que llega a la superficie y el acortamiento del día hace que la temperatura de la superficie del suelo comience a disminuir más rápidamente que la de las capas más profundas. Como resultado, el gradiente vertical de temperatura cambia de signo y la temperatura pasa a aumentar con la profundidad. Esta situación llega a su límite en invierno, cuando la temperatura superficial es sensiblemente inferior a la de las capas internas del suelo. De esta forma, en otoño e invierno el gradiente vertical de temperatura es positivo en las dos parcelas de observación todas las temporadas estudiadas y, además, el valor absoluto de este gradiente es superior en invierno que en otoño. El valor máximo del gradiente se registra en el mes de diciembre en las dos parcelas de observación, coincidiendo con el momento en el que la radiación solar incidente es mínima en el año.

En la parcela 1 el valor máximo de gradiente vertical invernal se registró la temporada 2001 - 2002 en la que la temperatura del suelo aumentó 8°C por cada metro de profundidad en los 10 primeros centímetros del suelo y, como media, 3,4°C/m.

La primavera, como el otoño, supone una estación de tránsito. A lo largo de los meses de marzo, abril y mayo, el manto de nieve desaparece, y aumentan la intensidad de la radiación solar y el número de horas diarias en las que el suelo se ve afectado por ella. Todos estos factores tienen como resultado un aumento de la temperatura superficial del suelo y, posteriormente, un aumento menos intenso de la temperatura de las capas internas de éste. En consecuencia, la temperatura en la superficie del suelo es superior que la temperatura en

las capas internas y el gradiente vertical disminuye hasta alcanzar valores próximos a $0^{\circ}\text{C}/\text{m}$. Todas las temporadas, salvo las de 2001 - 2002 y 2010 - 2011 y, en la parcela 2 la 2002 - 2003, el gradiente vertical de temperatura en primavera es positivo y toma valores entre 0 y $1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ (figura 52). Para las temporadas 2001 - 2002 y 2010 - 2011, el gradiente vertical de temperaturas en primavera es negativo, con valores mínimos de $-2,6^{\circ}\text{C}/\text{m}$ en la parcela 1 y de $-2,9^{\circ}\text{C}/\text{m}$ en la parcela 2 en las capas superficiales. Este resultado nos permite suponer que estas temporadas el calentamiento del suelo se produjo al principio de la primavera de manera que el suelo aumentó su temperatura de forma constante a lo largo de toda la primavera y, a finales de ésta, la superficie se encontraba ya más caliente que las capas más internas. De hecho, estas temporadas fueron las dos únicas de la serie de observación en las que el mes de mayo superó los 4°C en superficie y los 3°C a la profundidad de 80 centímetros en ambas estaciones, lo que indica el carácter especialmente cálido de estas primaveras. La temporada 2002 - 2003, en la parcela 2, el gradiente es de $-0,3^{\circ}\text{C}/\text{m}$ entre las profundidades de 20 y 80 centímetros, lo que indica que, entre esas profundidades se produce un ligero descenso de la temperatura con la profundidad.

Como se ha comentado en el apartado anterior, la parcela de observación 1 presenta un comportamiento térmico más extremo, con temperaturas máximas más elevadas y mínimas menores que la parcela 2. Este comportamiento también se observa en la serie de gradientes de temperatura.

En verano, los gradientes verticales de temperatura son similares en ambas parcelas. Las mayores diferencias se presentan en las capas superficiales en las que pueden existir diferencias de hasta $6,9^{\circ}\text{C}/\text{m}$ entre los valores del gradiente entre 10 y 20 centímetros de profundidad de las dos parcelas ($-13,7^{\circ}\text{C}/\text{m}$ en la parcela 1 y $-6,8^{\circ}\text{C}/\text{m}$ en la parcela 2, en la temporada 2002 - 2003); esta diferencia se reduce drásticamente en las capas más profundas. En otoño e invierno el gradiente vertical de temperatura es también mayor, en general, en la parcela 1, aunque su valor absoluto es menor. Todos estos resultados corroboran la idea de que en la parcela 1 el cambio de temperatura con la profundidad es más intenso, tanto en invierno como en verano, y la diferencia entre la temperatura en superficie y en profundidad, mayor.

4.6. Temperatura del suelo. Oscilación térmica del suelo.

En las figuras 53 a 59 aparecen resumidos los valores medios mensuales de la oscilación térmica diurna del suelo en °C, en las dos parcelas de observación, para las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros en cada temporada de observación.

Parcela 1 Temporada 2001 - 2002					Parcela 2 Temporada 2001 - 2002				
	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm		10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre					Septiembre				
Octubre	3,15	0,80	0,56	0,32	Octubre	5,81	1,91	1,19	0,47
Noviembre	1,08	0,29	0,25	0,20	Noviembre	2,15	0,85	0,60	0,34
Diciembre	1,63	0,61	0,45	0,30	Diciembre	4,05	1,00	0,61	0,23
Enero	0,38	0,13	0,08	0,04	Enero	0,22	0,01	0,04	0,07
Febrero	1,63	0,53	0,34	0,16	Febrero	1,18	0,15	0,09	0,04
Marzo	0,33	0,08	0,05	0,01	Marzo	3,69	1,29	0,79	0,29
Abril	3,43	0,56	0,37	0,17	Abril	5,30	1,76	1,08	0,40
Mayo	5,11	1,59	1,09	0,59	Mayo	5,94	2,34	1,56	0,78
Junio					Junio				
Julio					Julio				
Agosto					Agosto				

Figura 53: Oscilación térmica media mensual a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2001 - 2002.

Parcela 1 Temporada 2002 - 2003					Parcela 2 Temporada 2002 - 2003				
	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm		10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre					Septiembre				
Octubre					Octubre				
Noviembre					Noviembre				
Diciembre	0,07	0,10	0,08	0,06	Diciembre	0,08	0,10	0,09	0,09
Enero	0,01	0,02	0,03	0,04	Enero	0,02	0,05	0,05	0,04
Febrero	0,00	0,00	0,02	0,03	Febrero	0,00	0,00	0,00	0,00
Marzo	0,04	0,01	0,01	0,02	Marzo	0,00	0,02	0,01	0,01
Abril	0,00	0,04	0,06	0,07	Abril	0,04	0,01	0,00	0,00
Mayo	3,56	1,49	1,02	0,55	Mayo	0,00	0,01	0,06	0,11
Junio	11,82	3,36	2,42	1,48	Junio	6,00	1,24	1,52	1,79
Julio	15,95	4,14	2,81	1,48	Julio	18,92	16,08	9,98	3,87
Agosto	13,81	3,54	2,43	1,32	Agosto	13,74	12,24	7,74	3,25

Figura 54: Oscilación térmica media mensual a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2002 - 2003.

Parcela 1 Temporada 2003 - 2004					Parcela 2 Temporada 2003 - 2004				
	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm		10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre					Septiembre				
Octubre					Octubre				
Noviembre	1,08	0,66	0,41	0,15	Noviembre	1,36	1,28	1,04	0,81
Diciembre	0,25	0,04	0,04	0,04	Diciembre	0,04	0,04	0,05	0,05
Enero	0,03	0,02	0,01	0,00	Enero	0,00	0,02	0,08	0,13
Febrero	0,05	0,02	0,03	0,04	Febrero	0,14	0,12	0,08	0,03
Marzo	0,04	0,01	0,00	0,00	Marzo	0,02	0,02	0,01	0,00
Abril	0,00	0,10	0,06	0,02	Abril	0,00	0,00	0,00	0,00
Mayo	0,00	0,08	0,04	0,00	Mayo	0,00	0,00	0,00	0,00
Junio	8,70	3,06	1,82	0,58	Junio	0,14	0,14	0,12	0,10
Julio	14,40	4,75	2,73	0,72	Julio				
Agosto					Agosto				

Figura 55: Oscilación térmica media mensual a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2003 - 2004.

Parcela 1

Temporada 2005 - 2006

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre	7,19	2,42	1,56	0,70
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	0,04	0,03	0,03	0,04
Enero	0,00	0,03	0,05	0,01
Febrero	0,02	0,01	0,00	0,00
Marzo	0,00	0,02	0,04	0,04
Abril	0,02	0,03	0,04	0,05
Mayo	4,16	3,49	1,98	0,74
Junio	11,15	9,15	4,99	1,74
Julio	12,93	10,57	5,71	1,94
Agosto	11,94	9,53	5,00	1,80

Parcela 2

Temporada 2005 - 2006

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre				
Enero				
Febrero				
Marzo				
Abril				
Mayo				
Junio				
Julio				
Agosto				

Figura 56: Oscilación térmica media mensual a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2005 - 2006.**Parcela 1**

Temporada 2007 - 2008

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre				
Enero				
Febrero				
Marzo				
Abril				
Mayo				
Junio				
Julio				
Agosto				

Parcela 2

Temporada 2007 - 2008

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	0,62	0,56	0,35	0,15
Enero	0,08	0,08	0,09	0,09
Febrero	0,00	0,01	0,02	0,04
Marzo	0,84	0,73	0,42	0,11
Abril	0,08	0,08	0,08	0,08
Mayo	0,01	0,01	0,01	0,01
Junio	5,04	4,39	2,44	0,48
Julio	6,47	5,61	3,03	0,46
Agosto	6,36	5,51	2,95	0,40

Figura 57: Oscilación térmica media mensual a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2007 - 2008.**Parcela 1**

Temporada 2009 - 2010

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre	2,62	2,37	1,59	0,82
Noviembre	0,97	0,89	0,66	0,44
Diciembre	0,36	0,33	0,26	0,18
Enero	0,00	0,01	0,02	0,04
Febrero	0,01	0,01	0,01	0,02
Marzo	0,03	0,02	0,02	0,01
Abril	0,11	0,11	0,09	0,07
Mayo	0,46	0,43	0,32	0,22
Junio	3,58	3,23	2,19	1,14
Julio	5,31	4,76	3,10	1,45
Agosto	4,91	4,41	2,90	1,40

Parcela 2

Temporada 2009 - 2010

	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre				
Octubre	4,00	3,59	2,33	1,08
Noviembre	2,10	1,91	1,32	0,73
Diciembre	0,39	0,36	0,28	0,20
Enero	0,01	0,02	0,04	0,06
Febrero	0,04	0,04	0,03	0,02
Marzo	0,00	0,00	0,00	0,00
Abril	0,04	0,04	0,03	0,02
Mayo				
Junio				
Julio	4,65	4,14	2,63	1,12
Agosto	4,48	3,96	2,39	0,82

Figura 58: Oscilación térmica media mensual a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2009 - 2010.

Parcela 1					Parcela 2				
Temporada 2010 - 2011					Temporada 2010 - 2011				
	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm		10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
Septiembre	4,12	3,73	2,55	1,37	Septiembre	4,41	3,94	2,55	1,16
Octubre	2,42	2,20	1,52	0,84	Octubre	4,08	3,66	2,41	1,15
Noviembre	0,12	0,11	0,10	0,10	Noviembre	0,55	0,53	0,46	0,38
Diciembre	0,21	0,19	0,16	0,12	Diciembre	0,05	0,06	0,08	0,10
Enero	0,01	0,01	0,00	0,00	Enero	0,04	0,04	0,05	0,06
Febrero	0,09	0,08	0,04	0,00	Febrero	0,01	0,01	0,01	0,01
Marzo	0,00	0,00	0,00	0,00	Marzo	0,03	0,03	0,02	0,02
Abril	0,00	0,00	0,02	0,03	Abril	0,01	0,02	0,02	0,03
Mayo	2,16	1,94	1,30	0,65	Mayo	3,28	2,91	1,82	0,72
Junio	5,47	4,89	3,16	1,42	Junio	4,55	4,01	2,41	0,80
Julio	6,08	5,44	3,52	1,60	Julio	5,34	4,69	2,75	0,80
Agosto	5,97	5,35	3,48	1,61	Agosto	5,27	4,67	2,86	1,06

Figura 59: Oscilación térmica media mensual a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2010 - 2011.

Todas las temporadas, la oscilación media mensual presenta valores máximos en las dos parcelas de observación en el mes de julio y mínimos, entre enero y abril.

En los meses de invierno, la oscilación térmica tiene valores próximos a 0°C, de forma que el suelo se mantiene a una temperatura prácticamente constante. Durante esos meses la existencia de periodos prolongados de nieve en el suelo impide la llegada de radiación solar al suelo, y la que llega es de poca intensidad y lo hace durante pocas horas.

Al desaparecer la nieve a lo largo de la primavera, aumenta la radiación que alcanza la superficie, así como la intensidad de ésta, el suelo se calienta y la temperatura experimenta variaciones diurnas cada vez más amplias. En las dos parcelas este proceso tiende a tener lugar a lo largo del mes de mayo, por lo que la oscilación térmica experimenta un importante crecimiento respecto al mes de abril. Sin embargo, existen algunos casos, como las temporadas 2003 - 2004, 2007 - 2008 y 2009 - 2010 (figuras 55, 57 y 58), en las que este aumento de oscilación térmica no se produce hasta el mes de junio, lo que permite intuir que la nieve fue especialmente duradera esas temporadas. También existen temporadas (2001 - 2002) (figura 53) que se caracterizan por los valores anormalmente elevados de oscilación que registraron las dos parcelas de observación (superiores a 3°C en abril en la parcela 1 y en marzo en la parcela 2) y que son la consecuencia del carácter anormalmente seco y sin nieve de esa temporada.

En verano la oscilación térmica mensual es elevada en las dos parcelas de observación, alcanzando en julio de 2003 (figura 54) los valores de 15,9°C en la parcela 1 y 18,9°C en la parcela 2 en las capas más superficiales del suelo, a 10 centímetros de profundidad. En las capas más internas del suelo la oscilación térmica disminuye rápidamente y, ese mismo mes, a 80 centímetros de profundidad tomó un valor medio de 1,5°C en la parcela 1 y de 3,9°C en la parcela 2. Estos resultados vuelven a reforzar la idea de que las capas más internas del suelo presentan cierta “resistencia” a cambiar de temperatura y experimentan cambios térmicos más suaves.

En otoño, de forma simultanea a la disminución de la radiación solar entrante, la oscilación térmica vuelve a disminuir, experimentando un importante descenso entre los meses de noviembre y diciembre, a la vez que se consolida la presencia del manto de nieve en el suelo.

En las dos parcelas, la oscilación térmica toma valores similares en los meses centrales del invierno y en verano, las diferencias más significativas tienen lugar en las estaciones de cambio, primavera y otoño, de forma simultánea a la aparición y la desaparición del manto de nieve. En la parcela 2, que se caracteriza por una mayor persistencia del manto nivoso, la oscilación térmica tarda más en registrar el ascenso primaveral de forma que, en meses como el de abril o mayo, pueden registrarse importantes diferencias en los valores de la oscilación térmica de las dos parcelas, si en una de ellas ha desaparecido la nieve y en la otra todavía está presente. Como ejemplo se puede señalar el mes de junio de 2004 (figura 55), en el que la oscilación térmica mensual a 10 centímetros de profundidad es de 8,7°C y en la parcela 2 toma un valor de 0,14°C indicando que, en ésta última, el manto nivoso todavía estuvo presente ejerciendo su efecto de capa aislante sobre la superficie del suelo.

Con respecto a la variación vertical, la oscilación media mensual es máxima en superficie y mínima a 80 centímetros, donde sólo supera los 2°C los meses de julio y agosto de 2003 (figura 54). Este verano se caracterizó por las elevadas temperaturas que se alcanzaron y por la persistencia de los periodos con temperaturas elevadas. Así, en el observatorio meteorológico del Puerto de Navacerrada, en el mes de agosto, la temperatura media mensual, la media mensual de las máximas y la media mensual de las mínimas fueron 19,5°C, 25,5°C y 13,5°C, mientras que los valores de referencia del periodo 1971 - 2000 (INM, 2002) para ese mismo mes y observatorio son de 16,3°C, 21,2°C y 11,3°C respectivamente. Esta situación provocó que el suelo se calentase de forma intensa y constante a lo largo del verano y que este calentamiento se transmitiese a las capas más internas de éste, alcanzándose los valores máximos de oscilación térmica.

4.7. Temperatura del suelo. Días con suelo helado.

Además del valor absoluto de la temperatura del suelo, las variaciones de ésta son también un importante factor a la hora de evaluar su influencia en el desencadenamiento de distintos procesos geomorfológicos. Los periodos en los que el suelo está helado, así como los que el suelo experimenta episodios de congelación y fusión, tienen importantes consecuencias geomorfológicas. Las temperaturas de suelo negativas son indicativas de la presencia de suelos helados. Si estas temperaturas tienen un valor absoluto pequeño, esto es, están próximas a 0°C, y van acompañadas de oscilaciones térmicas frecuentes pueden producirse cambios de fase hielo/deshielo que favorecen el aumento de contenido en agua líquida del suelo con las consecuencias geomorfológicas que ello conlleva (aumento de deslizamientos o de solifluxión entre otros).

En las figuras 60 a 66 aparece resumido el número de días mensual en los que el suelo se mantuvo todo el día con una temperatura inferior a 0°C para las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros en cada temporada de observación.

Parcela 1 Temporada 2001 - 2002					Parcela 2 Temporada 2001 - 2002				
	D- 10	D- 20	D- 50	D- 80		D- 10	D- 20	D- 50	D- 80
Septiembre					Septiembre				
Octubre	0	0	0	0	Octubre	0	0	0	0
Noviembre	21	2	0	0	Noviembre	4	0	0	0
Diciembre	30	31	21	18	Diciembre	14	13	6	0
Enero	30	31	31	31	Enero	29	31	0	0
Febrero	28	28	28	28	Febrero	21	23	0	0
Marzo	31	31	31	31	Marzo	17	15	0	0
Abril	14	24	22	22	Abril	0	0	0	0
Mayo	4	0	0	0	Mayo	0	0	0	0
Junio					Junio				
Julio					Julio				
Agosto					Agosto				

Figura 60: Número mensual de días con temperatura del suelo inferior a 0°C a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2001 - 2002.

Parcela 1 Temporada 2002 - 2003					Parcela 2 Temporada 2002 - 2003				
	D- 10	D- 20	D- 50	D- 80		D- 10	D- 20	D- 50	D- 80
Septiembre					Septiembre				
Octubre					Octubre				
Noviembre					Noviembre				
Diciembre	0	0	0	0	Diciembre	0	0	0	0
Enero	2	2	0	0	Enero	0	0	0	1
Febrero	0	0	0	0	Febrero	0	0	0	0
Marzo	14	0	0	0	Marzo	0	0	0	0
Abril	30	1	0	0	Abril	0	0	0	0
Mayo	20	15	0	0	Mayo	31	0	0	11
Junio	0	0	0	0	Junio	18	0	0	0
Julio	0	0	0	0	Julio	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0	Agosto	0	0	0	0

Figura 61: Número mensual de días con temperatura del suelo inferior a 0°C a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2002 - 2003.

Parcela 1

Temporada 2003 - 2004

	D- 10	D- 20	D- 50	D- 80
Septiembre				
Octubre				
Noviembre	0	0	0	0
Diciembre	30	5	0	0
Enero	31	18	0	0
Febrero	28	7	0	0
Marzo	31	30	0	0
Abril	30	15	0	0
Mayo	31	19	0	0
Junio	7	7	0	0
Julio	0	0	0	0
Agosto				

Parcela 2

Temporada 2003 - 2004

	D- 10	D- 20	D- 50	D- 80
Septiembre				
Octubre				
Noviembre	0	0	0	0
Diciembre	2	2	0	0
Enero	0	0	0	0
Febrero	11	11	9	9
Marzo	31	31	31	31
Abril	30	30	30	30
Mayo	31	31	31	31
Junio	29	29	29	29
Julio				
Agosto				

Figura 62: Número mensual de días con temperatura del suelo inferior a 0°C a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2003 - 2004.

Parcela 1

Temporada 2005 - 2006

	D- 10	D- 20	D- 50	D- 80
Septiembre	0	0	0	0
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	31	6	0	0
Enero	31	0	0	0
Febrero	26	0	0	0
Marzo	31	0	0	0
Abril	30	7	0	0
Mayo	17	17	0	0
Junio	0	0	0	0
Julio	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0

Parcela 2

Temporada 2005 - 2006

	D- 10	D- 20	D- 50	D- 80
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre				
Enero				
Febrero				
Marzo				
Abril				
Mayo				
Junio				
Julio				
Agosto				

Figura 63: Número mensual de días con temperatura del suelo inferior a 0°C a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2005 - 2006.

Parcela 1

Temporada 2007 - 2008

	D- 10	D- 20	D- 50	D- 80
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre				
Enero				
Febrero				
Marzo				
Abril				
Mayo				
Junio				
Julio				
Agosto				

Parcela 2

Temporada 2007 - 2008

	D- 10	D- 20	D- 50	D- 80
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre	3	0	0	0
Enero	0	0	0	0
Febrero	0	0	0	0
Marzo	3	0	0	0
Abril	12	6	0	0
Mayo	29	29	0	0
Junio	2	2	0	0
Julio	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0

Figura 64: Número mensual de días con temperatura del suelo inferior a 0°C a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2007 - 2008.

Parcela 1

Temporada 2009 - 2010

	D- 10	D- 20	D- 50	D- 80
Septiembre				
Octubre	0	0	0	0
Noviembre	0	0	0	0
Diciembre	9	8	5	2
Enero	0	0	0	0
Febrero	0	0	0	0
Marzo	0	0	0	0
Abril	0	0	0	0
Mayo	0	0	0	0
Junio	0	0	0	0
Julio	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0

Parcela 2

Temporada 2009 - 2010

	D- 10	D- 20	D- 50	D- 80
Septiembre				
Octubre	0	0	0	0
Noviembre	1	0	0	0
Diciembre	10	10	3	0
Enero	0	0	0	0
Febrero	0	0	0	0
Marzo	0	0	0	0
Abril	0	0	0	0
Mayo				
Junio				
Julio	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0

Figura 65: Número mensual de días con temperatura del suelo inferior a 0°C a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2009 - 2010.

Parcela 1

Temporada 2010 - 2011

	D- 10	D- 20	D- 50	D- 80
Septiembre	0	0	0	0
Octubre	0	0	0	0
Noviembre	0	0	0	0
Diciembre	3	3	0	0
Enero	0	0	0	0
Febrero	0	0	0	0
Marzo	0	0	0	0
Abril	0	0	0	0
Mayo	0	0	0	0
Junio	0	0	0	0
Julio	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0

Parcela 2

Temporada 2010 - 2011

	D- 10	D- 20	D- 50	D- 80
Septiembre	0	0	0	0
Octubre	0	0	0	0
Noviembre	0	0	0	0
Diciembre	0	0	0	0
Enero	0	0	0	0
Febrero	0	0	0	0
Marzo	0	0	0	0
Abril	0	0	0	0
Mayo	0	0	0	0
Junio	0	0	0	0
Julio	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0

Figura 66: Número mensual de días con temperatura del suelo inferior a 0°C a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2010 - 2011.

En las dos parcelas, el número de días con el suelo helado es máximo a finales de invierno y en primavera, salvo en las temporadas 2009 - 2010 y 2010 - 2011 en las que se registra en el mes de diciembre.

En términos generales, el número de días con suelo helado es máximo en las capas superficiales y va disminuyendo conforme aumentamos la profundidad, de forma que, en la parcela 1, a 80 centímetros de profundidad, el número de días con suelo helado es superior a 2 sólo la temporada 2001 - 2002 y en la parcela 2, el mes de mayo de 2003 y los meses de febrero a junio de 2004. Sin embargo, en superficie el número de días con suelo helado es superior a 2 todas las temporadas en la parcela 1 y todas salvo la 2010 - 2011 en la parcela 2. El número de días con el suelo helado varía mucho de unas temporadas a otras. En la temporada 2003 - 2004 se registraron 188 días en la parcela 1 a 10 centímetros de profundidad y 101 a 20 centímetros y, en la parcela 2, 134 a 10 y a 20 centímetros y 130 a 50 y a 80 centímetros. Otras temporadas, como la 2010 - 2011 sólo se observaron 3 días con suelo helado en la parcela 1 en el mes de diciembre.

Todas las temporadas, salvo los meses de mayo y junio de 2003 y los de febrero a junio de 2004, la parcela 1 registra un mayor número de días con el suelo helado que la parcela 2. La explicación a este comportamiento radica nuevamente en la mayor innivación que presenta esta última, lo que da lugar a una acción aislante del manto de nieve que impide el enfriamiento de la superficie del suelo y su congelación.

4.8. Temperatura del suelo. Ciclos de hielo deshielo.

Tan importante como el número de días con el suelo helado es, por sus consecuencias geomorfológicas, el número de ciclos de hielo - deshielo que se registran en el suelo a lo largo de la temporada.

El cálculo del número de ciclos de hielo - deshielo en el suelo se ha realizado siguiendo la metodología de *Marcos y Palacios* (2004), calculando el número de veces que la temperatura cambia en el suelo de positiva a negativa (hielo) o de negativa a positiva (deshielo).

En la figura 67 aparece el número de ciclos hielo - deshielo registrado en cada una de las parcelas de observación por temporadas y profundidad.

Parcela 1					Parcela 2				
Temporada	Profundidad				Temporada	Profundidad			
	10 cm	20 cm	50 cm	80 cm		10 cm	20 cm	50 cm	80 cm
2001 - 2002	17	2	2	2	2001 - 2002	34	5	4	0
2002 - 2003	14	15	0	0	2002 - 2003	11	4	4	25
2003 - 2004	9	35	0	0	2003 - 2004	11	11	4	3
2005 - 2006	3	12	0	0	2005 - 2006				
2007 - 2008					2007 - 2008	26	18	3	2
2009 - 2010	4	5	5	2	2009 - 2010	8	4	3	0
2010 - 2011	4	4	5	0	2010 - 2011	1	0	0	0

Figura 67: Número de ciclos hielo - deshielo por temporada a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros.

En general, el número de ciclos de hielo deshielo es máximo en superficie y mínimo en los niveles más profundos de este, a 80 centímetros de profundidad, aunque hay temporadas que el número máximo de ciclos se registra a 20 centímetros de profundidad e incluso en capas más profundas, como ocurrió la temporada 2002 - 2003 en la parcela 2, cuando a 80 centímetros de profundidad se llegaron a registrar 25 ciclos de hielo - deshielo, mientras que en las capas superficiales sólo se registraron 11 ciclos. Sin embargo, en este caso el resultado puede estar influido por la metodología utilizada para el cálculo de los ciclos de hielo - deshielo. Esta metodología tiene el inconveniente de que, cuando el suelo se encuentra a una temperatura próxima a 0°C oscilando su valor ligeramente entre -0,1 y 0,1°C, este proceso se computa como un ciclo aunque el cambio de fase no se llegue a producir en realidad.

Para que el proceso de hielo - deshielo del suelo tenga lugar es necesario que la temperatura del suelo experimente variaciones de cierta intensidad y, como se ha visto anteriormente, eso sólo es posible si el suelo se encuentra expuesto a las variaciones de la temperatura del aire.

Por lo tanto, la ocurrencia de ciclos hielo - deshielo es más probable en los periodos en los que no existe sobre el suelo un manto de nieve que lo aíse. Este hecho explica que el número de ciclos hielo - deshielo varía mucho de unas temporadas a otras de forma similar a lo que ocurre con la innivación.

La temporada 2001 - 2002, que se caracterizó por la escasez de precipitaciones y por la ausencia de manto de nieve estacional, presenta los valores máximos del número de ciclos de hielo - deshielo; en la parcela 1, se registraron 17 a 10 centímetros de profundidad y 2 a 20, 50 y 80 centímetros, y, en la parcela 2, 34 ciclos a 10 centímetros, 5 a 20 centímetros, 4 a 50 centímetros y ninguno a 80 centímetros de profundidad.

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN

Las áreas de montaña desempeñan un importante papel en el sistema climático global y son espacios de vital importancia como fuente de recursos biológicos e hidrológicos entre otros, por lo que su conocimiento y caracterización desde el punto de vista climático es esencial.

La sensibilidad de las áreas de montaña a los cambios de las variables climatológicas supone también que sirvan como espacios que permiten detectar posibles variaciones en el clima futuro (Beniston, 1997). Además, existen numerosos procesos característicos de las zonas de montaña que están estrechamente ligados a las variables meteorológicas. En concreto, algunos tipos de erosión y de movimientos en masa o el tipo y dinámica de la vegetación están condicionados por variables como el comportamiento térmico del suelo o la presencia de nieve y sus características. Esto permite suponer que existen interacciones entre las posibles alteraciones en el clima de estas áreas y la variación de otros elementos como la vegetación, la nivología, la actividad geomorfológica o la disposición de recursos hídricos.

El análisis pormenorizado y la modelización de la evolución del clima de las áreas de montaña presentan dos dificultades importantes. En primer lugar, es necesario disponer de una serie de datos suficientemente larga, fiable y completa de variables como la temperatura, la precipitación, la dirección y la fuerza del viento, la humedad o la ocurrencia de determinados procesos meteorológicos. Las condiciones que han de soportar los equipos de medida y la dificultad de acceso de éstos complican la obtención de esos datos. Además, las redes de estaciones climatológicas en montaña han de presentar una mayor densidad que en zonas llanas, debido a que las variaciones en la topografía y la orografía tienen importantes consecuencias en las variables climatológicas. Por otro lado, el conocimiento de la evolución del clima en áreas de montaña precisa de la utilización de modelos numéricos a los que, además de las series de datos climatológicos, como información de partida hay que suministrarles una descripción detallada de la topografía del área de estudio lo cual, en zonas de montaña, supone un problema añadido (Beniston, 1997).

La serie de datos meteorológicos registrados en el circo de Dos Hermanas, próximas a las cumbres más elevadas de la Sierra de Guadarrama, hacen posible realizar una aproximación cualitativa a las características climáticas de esta área. Sin embargo, la corta duración de la serie, la existencia de lagunas en ella y los cambios en la metodología de observación, sobre todo la falta de uniformidad en las profundidades de medida, no permiten establecer resultados cuantitativos significativos y limitan la posibilidad de realizar comparaciones con los obtenidos en otras áreas.

Los resultados permiten enmarcar la zona de estudio dentro de los espacios de montaña mediterránea. Distintos estudios referidos a ésta y a otras áreas de montaña mediterránea (Teles *et al.*, 2003; Herrero *et al.*, 2009; Andrés y Palacios, 2010, entre otros) señalan como una de las principales características de estos espacios la gran variabilidad tanto inter como intra anual en los parámetros climatológicos.

La precipitación es la magnitud meteorológica que presenta una mayor variabilidad en estas áreas, tanto en su distribución espacial y temporal como en las características y en el tipo. Así, la distribución espacial de las precipitaciones no presenta, en general, patrones altitudinales (Herrero *et al.*, 2009; Andrés y Palacios, 2010), sino que está condicionada por el esquema de vientos dominantes y por la orografía. La distribución espacial de la precipitación en forma de nieve es especialmente heterogénea. Si bien los episodios más importantes de precipitación tienen lugar con las perturbaciones del norte y noroeste, la nieve caída frecuentemente es barrida por los vientos dominantes de forma que las mayores acumulaciones se producen en zonas a sotavento de estos vientos, en las laderas con orientación este y sureste ocupando las áreas en las que estuvieron ubicados los antiguos glaciares, de forma similar a como ocurre en otras zonas de la Sierra de Guadarrama según concluyen autores como Palacios *et al.* (2004), Muñoz y García (2004) y Andrés *et al.* (2007). El tipo de precipitación y sus características también varía mucho a lo largo del año. En invierno las precipitaciones son en forma de nieve sobre todo en cotas altas, aunque es frecuente que el manto de nieve no sea continuo durante toda la temporada, sino que se alternen periodos con nieve en el suelo y periodos en los que el manto está ausente. Las precipitaciones líquidas son frecuentes en la primavera y el otoño y, cuando se producen acompañadas de tormenta, tienen un carácter intenso concentrándose toda la precipitación en un corto espacio de tiempo.

La distribución temporal de la precipitación muestra también una marcada heterogeneidad, alternándose periodos con precipitaciones abundantes con otros en los que la ausencia de éstas es prolongada. La variabilidad temporal de las precipitaciones no presenta un patrón temporal determinado siendo muy marcada tanto a escala mensual como inter o intra anual. La discontinuidad espacial y temporal del manto de nieve, que es una característica particular de estas áreas de montaña, unida a la variabilidad temporal de las precipitaciones tiene importantes consecuencias en el régimen térmico del suelo.

Las temperaturas también tienen un carácter extremo en el área de estudio alcanzando los 32°C en verano y valores de hasta -17,9°C en los meses invernales. Esta variabilidad también queda patente en las oscilaciones térmicas diarias, mensuales e, incluso interanuales, ya que de un año a otro la temperatura del aire puede presentar valores muy dispares en el mismo momento. Así, el día 10 de diciembre de 2006 se registraron -6,2°C y, ese mismo día, en el año 2009, la temperatura del aire fue de 6,1°C. Este comportamiento también se observa en verano (el día 22 de agosto 9,8°C el día 22 de agosto de 2005 y 19,5°C el 22 de agosto de 2010) y en otoño (11,3°C el 26 de septiembre de 2009 y 3,4°C el 26 de septiembre de 2010), lo que permite suponer que estas oscilaciones térmicas interanuales se producen en cualquier época del año.

La combinación de la distribución de temperaturas y precipitaciones a lo largo del año da lugar a la ocurrencia de prolongados periodos de aridez que, aunque son mas frecuentes en

verano, también se pueden producir durante el invierno, y que tienen importantes consecuencias geomorfológicas, tal y como han señalado Marcos y Palacios (2004).

Otra consecuencia de la combinación del comportamiento de las temperaturas y las precipitaciones es la escasa humedad atmosférica del aire que puede tener como consecuencia, tal y como ha señalado Herrero *et al.* (2009) en Sierra Nevada, una evaporación directa del manto de nieve en periodos invernales, lo que provoca una disminución del manto de nieve y, además, una menor disponibilidad de agua de fusión del manto y una disminución de la capacidad aislante de éste.

Al igual que ocurre con otras variables meteorológicas en áreas mediterráneas, las temperaturas del suelo en el área de estudio se caracterizan por su alta variabilidad, de forma que presentan un comportamiento muy diferente de unos años a otros y, en cada temporada, de unas estaciones del año a otras. Dentro de esta variabilidad, la evolución anual de las temperaturas del suelo está íntimamente relacionada con la evolución del manto nivoso y sus características aunque, tal y como señalan Gadek y Kedzia (2008), Gadek y Leszkiewicz (2010) y Gadek (2012) para otras áreas de montaña de latitudes mayores, también se ven condicionadas por otros factores como la topografía y la temperatura del aire.

En verano la temperatura del suelo es elevada debido a varias razones. En primer lugar, la temperatura del aire registra sus valores máximos y el suelo se calienta por conducción desde la superficie hacia el interior de forma que, en ocasiones, la temperatura de las capas más externas del suelo puede llegar a superar a la del aire. Este efecto, que Teles *et al.* (2003) han cuantificado en la Serra da Estrela (Portugal) en una diferencia de 5 ó 6°C, no se puede establecer para la estación de observación de Dos Hermanas de forma tan precisa, aunque se comprueba en algunas temporadas, por ejemplo, el día 10 de julio de 2005, la temperatura media del aire fue de 14,7°C y la temperatura media del suelo a 10 centímetros de profundidad alcanzó 17,9°C en la parcela 1. Además, en verano la radiación que llega a la Tierra es más intensa, debido a la menor inclinación de los rayos solares respecto a la superficie, y la duración del día también es mayor, por lo que el balance radiativo en la superficie del suelo presenta una clara tendencia al calentamiento de éste. Un tercer factor que influye en el régimen térmico del suelo es la escasa humedad de éste debido a la ausencia de precipitaciones. El suelo seco se calienta más que el suelo húmedo, ya que, en el primer caso, no hay pérdida de energía destinada al calentamiento del agua contenida en el suelo. La acción conjunta de estos tres factores tiene como resultado que, en verano, las temperaturas del suelo sean elevadas y que los valores máximos se registren en la superficie de éste disminuyendo hacia el interior. Así, el perfil vertical de temperaturas del área de estudio presenta gran semejanza al establecido por Salvador *et al.* (2011) para Sierra Nevada y también al observado por Teles *et al.* (2003) en Serra da Estrela y, sin embargo, muestra diferencias significativas con el registrado a mayores latitudes por Farbroth *et al.* (2011).

El contacto directo del suelo con el aire en la época estival tiene también como consecuencia una respuesta rápida de las temperaturas del suelo a las variaciones de la temperatura del aire, de forma que la entrada de una masa de aire más fresca en verano tiene como consecuencia una disminución de las temperaturas del suelo apreciable en un corto espacio de tiempo.

En otoño las temperaturas del suelo disminuyen paulatinamente como consecuencia de la disminución de la temperatura del aire y de la intensidad de la radiación que llega a la superficie y a la menor duración de la insolación. La ocurrencia de precipitaciones aumenta la humedad del suelo y puede potenciar el enfriamiento de éste ya que, en este caso, el agua contenida en el suelo absorbe parte del calor, lo que implica una disminución de la temperatura. El perfil vertical de temperatura acusa este cambio en el balance energético y la temperatura pasa a ser menor en superficie que en profundidad, en donde persiste el calor acumulado en verano. Al igual que ocurre en verano, este comportamiento es también similar al observado en Sierra Nevada por Salvador *et al.* (2011).

La evolución de las temperaturas del suelo invernales en las estaciones de observación de Dos Hermanas muestra claras diferencias de unas temporadas a otras.

Un primer patrón presenta numerosas oscilaciones de temperatura en el suelo, más frecuentes e intensas en las capas superficiales que en las profundas. Además, este comportamiento suele ir acompañado por intensos gradientes térmicos en las capas superficiales y un número elevado de ciclos hielo/deshielo, tal y como ocurrió en otoño e invierno de la temporada 2001 - 2002 (figuras 52 y 67). Este comportamiento suele estar unido a una ausencia de precipitaciones en forma de nieve y puede explicarse si tenemos en cuenta que, tal y como demuestran autores como Mackay y Mackay (1974), Ishikawa (2003), Gadek y Kedzia (2008), Herrero *et al.* (2009), Andrés y Palacios (2010) y Farbroth *et al.* (2011) en áreas montañosas de distintos ámbitos climáticos, en el caso de ausencia de manto nivoso, no se produce aislamiento térmico del suelo con respecto al aire y las temperaturas del suelo responden directamente a las temperaturas del aire. Además, al no existir el manto, se facilita la emisión de radiación infrarroja del suelo, por lo tanto se potencia el enfriamiento de éste (MacKay y MacKay, 1974). Este enfriamiento se incrementa si se tiene en cuenta que la intensidad de la radiación que llega es menor, debido a la mayor inclinación de los rayos solares y a la menor insolación. El balance energético es, en consecuencia, negativo, dando lugar a un enfriamiento del suelo desde la superficie hacia el interior de éste. Sin embargo, tal y como observan Herrero *et al.* (2009) en Sierra Nevada, la elevada variabilidad que presenta el clima de montaña mediterráneo puede dar lugar a la ocurrencia de episodios cálidos en invierno durante los cuales, en ausencia de nieve, puede producirse un aumento de las temperaturas del suelo de forma esporádica. Este comportamiento, si bien se observa en otras áreas de mayor latitud como los Alpes franceses, según los resultados de Morin *et al.* (2012), es más frecuente e intenso en ámbitos más meridionales, en los que son mas

habituales los episodios en los que el manto nivoso desaparece y aparece a lo largo de la temporada invernal.

Un segundo esquema de comportamiento térmico invernal en el suelo se caracteriza por una separación de la evolución de la temperatura del aire y del suelo de forma que la primera presenta numerosas e intensas oscilaciones y, sin embargo, las temperaturas del suelo registran un valor prácticamente constante y próximo a 0°C, sin oscilaciones y alcanzando los valores mínimos a finales de primavera, poco antes del comienzo de la fusión del manto de nieve. Este modelo de evolución concuerda con los resultados obtenidos por Andrés y Palacios (2010), Gadek y Leszkiewicz (2010) y Morin *et al.* (2012), para temporadas en las que las precipitaciones de nieve han sido abundantes y el manto nivoso espeso y duradero. La explicación a este comportamiento se fundamenta en que la nieve aísla térmicamente el suelo de forma que éste no acusa los cambios en la temperatura del aire. Por otro lado, la nieve impide el enfriamiento del suelo por emisión de radiación infrarroja desde su superficie. Además, la superficie de la nieve, debido a su elevado albedo refleja gran parte de la radiación entrante. Todos estos procesos tienen como consecuencia el que la temperatura del suelo se mantenga más o menos constante, experimentando pocas variaciones mientras el manto persiste. Gadek y Leszkiewicz (2010) y Gadek (2012) incluyen además otro factor en el enfriamiento del suelo que tiene lugar cuando el manto de nieve no tiene continuidad espacial, sino que cubre el suelo de forma dispersa, alternándose zonas cubiertas de nieve y sin ésta. En esta situación, el suelo se enfría por las zonas no cubiertas por la nieve y este enfriamiento se extiende horizontalmente, de forma paulatina al resto de las áreas cubiertas de nieve. Esta contribución al enfriamiento es pequeña, aunque puede ser significativa en áreas en las que el manto de nieve no es continuo a lo largo de toda la temporada invernal y las temperaturas del aire presentan episodios elevados en algunos momentos del invierno, condiciones que se cumplen en numerosas ocasiones en la zona de estudio. Evidentemente, en el caso de que se produzca una entrada cálida, también es factible que se produzca un calentamiento del suelo.

En primavera, las temperaturas del suelo comienzan a ascender de forma gradual y este ascenso se intensifica rápidamente a partir de la fusión completa del manto de nieve, si éste ha estado presente. El suelo comienza a responder a la temperatura del aire que es cada vez más elevada y, además, recibe más cantidad de radiación solar debido al aumento de horas de insolación. La fusión del manto de nieve aumenta el contenido en agua líquida en el suelo que conduce el calor hacia las capas internas de éste. Así, el suelo va calentándose desde la superficie hacia el interior de forma lenta, lo que hace que el perfil vertical de temperaturas presente una acusada isoterma la mayor parte de las temporadas.

Al igual que ocurre en otras zonas estudiadas, aunque éstas estén situadas latitudes mayores (MacKay y MacKay, 1974), en el área de Peñalara se detecta una ligera tendencia a que se

produzca un desfase entre la ocurrencia de los valores extremos de temperatura de suelo entre la superficie y las capas más internas, si bien la serie de datos con la que se ha trabajado no permite llegar a resultados definitivos a este respecto. Sin embargo, como ya se ha comentado, sí que se ha detectado una “inercia” del suelo a los cambios térmicos, de forma que la intensidad y rapidez en la transmisión de las oscilaciones de temperatura del aire al suelo es función de la profundidad. Así, las variaciones en la temperatura del aire se transmiten a la superficie del suelo y, posteriormente, a las capas más profundas de éste, de forma que existe un “tiempo de retardo” entre las variaciones térmicas en la superficie y en las capas internas del suelo. La existencia de este “tiempo de retardo” hace que las oscilaciones rápidas en la temperatura del aire (que duran uno o dos días) sólo tengan consecuencias en la superficie del suelo y en sus capas más externas, pero que apenas lleguen a afectar a las capas más profundas de éste.

La existencia de dos parcelas de observación en la zona de estudio permite señalar pequeñas diferencias espaciales en el comportamiento térmico del suelo. A pesar de su proximidad, la diferente ubicación de cada una de estas parcelas en el nicho de nivación en el que se encuentran permite detectar cierta variabilidad espacial de las temperaturas del suelo en el nicho. Las áreas más elevadas y externas del nicho (Parcela 1), con mayor pendiente y menores acumulaciones de nieve en invierno, tienen un comportamiento térmico más extremo, con temperaturas más elevadas en verano y más frías en invierno, que las zonas más internas de este (Parcela 2), con menor pendiente y mayor persistencia y espesor de la nieve y donde las temperaturas medias estacionales y anuales son siempre positivas. Además, como norma general, las primeras también presentan, a todas las profundidades, mayores gradientes verticales de temperatura, mayor oscilación térmica (sobre todo en primavera y otoño), más días con el suelo helado y más ciclos hielo/deshielo. Estas diferencias son similares a las observadas en otros nichos de nivación de la Sierra de Guadarrama como el estudiado por Andrés y Palacios (2010) en el Ventisquero de la Condesa, que presenta también claras asimetrías espaciales en la evolución de las temperaturas de suelo y en la distribución del manto de nieve.

Es importante señalar que esta variabilidad espacial es más acusada en las capas superficiales del suelo que en las capas más profundas, lo que vuelve a poner de manifiesto la íntima relación que existe entre la temperatura del aire y la del suelo, mucho más importante que en otras zonas en las que el manto de nieve es más persistente, e incluso está presente a lo largo de todo el año, y en las que las temperaturas del suelo y el aire presentan un desacople total como el observado por MacKay y MacKay (1974) en Alaska.

Otra de las diferencias espaciales que se presentan es la diferencia en el momento de ocurrencia de los valores mínimos de temperatura del suelo. A pesar de que la serie de datos de que se dispone es corta y presenta lagunas, cabe señalar que, en general, las temperaturas mínimas se presentan, a todas las profundidades, ligeramente antes en la parte más externa

del nicho que en la parte central de éste coincidiendo con los sectores de éste en los que la nieve antes desaparece.

La serie de datos, a pesar de sus limitaciones, apoya los resultados obtenidos por Andrés y Palacios (2010) en el Ventisquero de la Condesa y permite suponer que es muy improbable la presencia de *permafrost* en el área de estudio en la actualidad. En efecto, las temperaturas del suelo no son lo suficientemente bajas como para suponer la existencia de una capa helada de carácter permanente. Aunque la temperatura del suelo descienda, como ocurrió en algunas temporadas analizadas (2001 - 2002) (figuras 27 y 36), los valores térmicos mas bajos se registran en momentos en los que la disponibilidad de agua en el suelo es escasa y, cuando este contenido en agua aumenta, normalmente por la fusión nival, las temperaturas ya no descienden por debajo de 0°C.

La relación entre el número de ciclos de hielo - deshielo y la actividad geomorfológica en la capa superficial del suelo ha quedado demostrada por numerosos autores (Washburn, 1979; Matsuoka, 1998). En áreas mediterráneas, Teles *et al.* (2003) han establecido la relación entre estos ciclos y el desencadenamiento de movimientos en masa, solifluxión, deslizamientos y formación de suelos poligonales.

Marcos y Palacios (2004), a partir de los datos de la temporada 2001-2002 en la zona de estudio, revelan la existencia de una relación clara entre el régimen térmico del suelo, la presencia de nieve y la actividad geomorfológica. Estos autores definen una relación inversa entre el número de ciclos hielo - deshielo y la presencia de manto nivoso señalando que el número de ciclos disminuye cuanto más duradero es el manto de nieve. Además exponen la idea de que si se dan las condiciones favorables de abundancia de la fracción fina del suelo, abundancia de agua y ausencia de vegetación la actividad geomorfológica tiene lugar a pesar de que el número de ciclos hielo - deshielo no sea elevado. Estos resultados fueron obtenidos a partir de los datos de una temporada que se caracterizó por la ausencia de precipitaciones y la escasez de nieve en el suelo. Sin embargo, la falta de observaciones relativas a la actividad geomorfológica continuada en el área de estudio no permite ampliar ni comprobar estos resultados en este trabajo, a pesar de que la serie de datos de temperatura del suelo sea mayor.

El régimen térmico del suelo puede ser utilizado como indicador de un posible cambio climático. Los escenarios establecidos de cambio climático para las zonas mediterráneas predicen una disminución de las precipitaciones en forma de nieve, así como un aumento de las temperaturas y las sequías (IPCC, 2008). Estas predicciones concuerdan con lo observado en el área de estudio donde, los datos del observatorio del Puerto de Navacerrada muestran un descenso en el número de días con precipitaciones en forma de nieve y de días con nieve en el suelo a lo largo de la segunda mitad del siglo XX (figuras 14 y 15).

La disminución de la nieve en el suelo tiene como consecuencia una variación en el régimen térmico del suelo. Así, en altas latitudes, una reducción de la persistencia del manto de nieve favorece el calentamiento del suelo y puede provocar una degradación de las capas de *permafrost* existente como han señalado autores como Farbrot *et al.* (2011). Sin embargo, en áreas de montaña mediterránea en las que no existe *permafrost*, la evolución de las temperaturas del suelo puede ser la contraria. La disminución del manto de nieve tiene como consecuencia la desaparición del efecto aislante que éste ejerce, de forma que el suelo se ve directamente afectado por la temperatura del aire acusando con mayor intensidad la entrada de masas de aire frío. Además, la desaparición de la nieve favorece el enfriamiento del suelo por radiación, ya que disminuye el efecto pantalla que desempeña el manto. El resultado final sería una disminución clara de las temperaturas del suelo invernales. Este comportamiento ha sido ya observado en distintas áreas de montaña de latitudes bajas por Teles *et al.* (2003) y Andrés y Palacios (2010), entre otros.

Del análisis realizado en este trabajo resulta indudable el interés que tiene el estudio de la evolución del régimen térmico en las áreas de montaña mediterráneas por las peculiaridades que presenta y por su valor como indicador de posibles cambios climáticos; lo que implica la necesidad de mantener, e incluso, aumentar la red de estaciones de observación en éstas áreas.

En primer lugar, es necesario mantener un sistema de registro de información de la temperatura del suelo de forma sistemática con el fin de obtener series de datos de calidad, continuas y homogéneas que permitan establecer resultados, no sólo cualitativos sino, también cuantitativos y comparables con los de otras zonas más o menos similares. En este sentido, es preciso establecer unos criterios claros relativos a la profundidad de las observaciones, periodicidad de observación y procedimientos de depuración de los datos. En el caso concreto de las profundidades de observación, como ya se ha comentado, la Organización Meteorológica Mundial establece las profundidades de 10, 20, 50 y 100 centímetros (WMO, 2008) como niveles tipo para la observación de las temperaturas del suelo, aunque en el caso de proyectos de investigación concretos, es necesario incrementar el número de profundidades de observación.

En la realización del presente trabajo se ha detectado la necesidad de mejorar la metodología utilizada para el cálculo de algunos parámetros a partir de las temperaturas del suelo. En concreto, para la obtención de los resultados relativos al número de días con suelo helado y ciclos de hielo - deshielo, es conveniente modificar el método utilizado ya que existen claras sospechas de que, con los criterios actuales, tanto el número de días con el suelo helado como el número de ciclos hielo - deshielo obtenidos sean superiores a los reales. El cálculo de los días con suelo helado se ha realizado a partir del número de días en los que el valor de la temperatura máxima diaria sea inferior a 0°C, y éste es en realidad un criterio necesario, pero no suficiente para que el suelo esté helado. En el caso de los procesos hielo - deshielo, también se ha considerado suficiente el hecho de que la temperatura oscile en

torno a 0°C cuando, realmente, son necesarias, además, otras condiciones para el cambio de fase (por ejemplo, la persistencia de la temperatura).

El gran número de factores que condicionan las temperaturas del suelo y las relaciones que se establecen entre ellos hace que, para mejorar el conocimiento del régimen térmico del suelo sea necesario disponer de información de otras muchas variables como el espesor del manto de nieve y las características de éste (contenido en agua líquida, tipo de cristales que constituyen el manto, densidad de la nieve etc). En este sentido hay que destacar los avances registrados en la obtención y el tratamiento de las imágenes de teledetección aplicados al estudio del manto de nieve y sus características. Estudios como los de Dozier (1989), Nolin y Dozier (1993), Rosenthal y Dozier (1996), König *et al.* (2001) y Dozier y Painter (2004) han contribuido al desarrollo de técnicas que permiten deducir, no solo la extensión del manto nivoso, sino también otras características como su espesor, tipo de grano y contenido en agua líquida a partir de la información de imágenes de satélite y radar. Estas técnicas han sido adaptadas en España para la caracterización del manto nivoso en distintos ámbitos de la Península, sobre todo en los Pirineos, por autores como Larrea *et al.* (2003) y Moreno *et al.* (2009a y 2009b), entre otros.

Para validar la información procedente de la teledetección se pueden utilizar los datos obtenidos en los sondeos nivometeorológicos realizados de forma conjunta por el personal del Parque y del observatorio meteorológico del Puerto de Navacerrada en los que, con una periodicidad semanal se registra, durante la temporada invernal, información sobre espesor del manto, tipo de granos que lo constituyen y densidad y contenido en agua líquida de la nieve.

La relación entre el balance radiativo y la evolución de las temperaturas del suelo también es un interesante objetivo de estudio. Teles *et al.* (2003) en la Serra da Estrela han señalado la importancia que tienen las variaciones en la llegada de radiación en la evolución temporal de las temperaturas del suelo. Los meses en los que la nubosidad es elevada y los cielos están muy nubosos o cubiertos y se producen precipitaciones líquidas, la radiación entrante disminuye y también lo hacen las temperaturas del suelo.

La distribución de la insolación en la Sierra de Guadarrama presenta ciertas particularidades frente al patrón general tal y como se ha señalado en la caracterización climática realizada a partir de los datos de la estación meteorológica ubicada en el Puerto de Navacerrada. En los meses primaverales el aumento de nubosidad provoca una ralentización del crecimiento de la temperatura del aire. Si estos meses no existe manto de nieve, este efecto puede transmitirse a las temperaturas del suelo que también experimentarían una ralentización en su crecimiento. Con la información actual de la que se dispone no se ha podido detectar este efecto de forma concluyente, aunque podría ser uno de los posibles objetivos futuros.

CAPITULO 6. CONCLUSIONES

La serie de datos de temperatura del aire y del suelo registrados en el circo de Dos Hermanas, próximo a las cumbres más elevadas del Macizo de Peñalara, permite enmarcar esta área dentro de la alta montaña mediterránea. Entre las características principales de estas áreas de montaña están las suaves temperaturas invernales, las altas temperaturas y la elevada aridez estival y la acusada variabilidad tanto espacial como temporal (inter e intra anual) de los parámetros meteorológicos. Los resultados obtenidos a partir de esta serie de datos confirman estas características, sobre todo, en lo que se refiere a la variabilidad espacial y temporal. Esta variabilidad se aprecia sobre todo en la precipitación y la acumulación de la nieve, que no se distribuyen espacialmente siguiendo patrones altitudinales, sino que están condicionados por el régimen de vientos dominantes y por la orografía, de forma que las mayores acumulaciones de nieve se localizan en las vertientes orientales del Macizo, a sotavento de los vientos dominantes y en zonas con una topografía favorable, heredada de la época glaciaria.

A escala temporal, variables como la temperatura, la precipitación, la intensidad del viento o el espesor del manto de nieve también presentan fuertes contrastes dentro de un año concreto y entre unos años a otros. Este resultado se ve claramente reflejado en la figura 11 en la que aparece la precipitación anual registrada en el observatorio meteorológico del Puerto de Navacerrada, y en el que se aprecia que hay años en los que se superan los 2.000 mm de precipitación (2.380 mm en 1972), mientras que otros no se alcanzan los 1.000 mm (806 mm el año 1990). La temperatura media anual del aire oscila entre los 4,3°C de 1972 y 7,9°C de 2006 y 2009. Además de esta variabilidad interanual de las variables climatológicas, otro de los rasgos que caracterizan al clima de estas áreas es el hecho frecuente de que se produzcan rápidas oscilaciones, de forma que, en el plazo de pocos días, se pueden registrar cambios en la temperatura de más de 10°C o precipitaciones diarias que superan los valores medios para ese mes, como se observa en la figura 7 en los meses estivales.

El análisis de la serie de datos de temperatura del aire y del suelo en ésta área confirman la hipótesis de que los factores más relevantes en la temperatura del suelo son la temperatura del aire, la presencia de un manto de nieve sobre éste y su balance radiativo.

Cuando el suelo no está cubierto de nieve, las temperaturas del suelo responden de forma directa a las temperaturas del aire y al balance radiativo en la superficie.

La respuesta del suelo a los cambios en la temperatura del aire es función inversa de la profundidad de manera que, a mayor profundidad la influencia de la temperatura del aire en la del suelo es menor. Además, las capas internas del suelo tardan más tiempo en acusar los cambios en la temperatura del aire. En consecuencia, las oscilaciones de la temperatura del aire se reflejan de forma más rápida e intensa en las capas superficiales del suelo que en las capas internas de éste, como se concluye del análisis del episodio registrado entre los días 21 y 30 de mayo de 2002 (figuras 34 y 35).

En relación con el balance de radiación, el resultado neto es positivo en verano, cuando la radiación solar es más intensa y los rayos solares llegan a la superficie de forma más directa, y cuando la pérdida de calor del suelo por radiación infrarroja es pequeña. En esta situación el suelo recibe más radiación de la que emite. En invierno y en ausencia de nieve, la radiación solar que llega a la superficie es menor, ya que el día es más corto y, además, la intensidad de esta radiación también lo es, debido a la mayor inclinación de los rayos solares. Por otro lado, la irradiación infrarroja del suelo es mayor, puesto que las noches son más largas. Esto hace que el balance radiativo neto y el calentamiento del suelo también lo sean. La presencia de un manto de nieve modifica este comportamiento. En los resultados obtenidos se comprueba que en invierno, cuando la nieve está presente sobre el suelo durante largos periodos de tiempo, el suelo no acusa, o lo hace de una forma muy ligera, las variaciones de la temperatura del aire. Este comportamiento puede atribuirse a que el manto de nieve se comporta como una capa aislante que impide la transmisión del calor del aire al suelo y viceversa. Este resultado, ya comprobado en muchos otros ámbitos geográficos, queda claramente demostrado en el comportamiento prácticamente isoterma del suelo sobre todo en los meses centrales del invierno.

La existencia de nieve en el suelo, además, tiene importantes consecuencias en el balance radiativo de éste, impidiendo la irradiación nocturna y la llegada de la radiación solar diurna. Otros factores, como la humedad del suelo, tienen una menor relevancia en el régimen térmico del suelo aunque, en áreas como las mediterráneas en las que esta humedad presenta fuertes variaciones, puede llegar a ser un elemento importante en el mayor o menor calentamiento del suelo. Cuando el suelo está húmedo, parte del calor que le llega se invierte en calentar el agua contenida en él y, por lo tanto, el suelo se calienta menos. Igualmente, parte de la pérdida de calor de un suelo húmedo es debida al enfriamiento del agua, por lo que los suelos húmedos se enfrían menos que los secos. En consecuencia, los cambios térmicos en un suelo húmedo son menos acusados que en un suelo seco.

Entre las características principales de las áreas de montaña mediterráneas se pueden señalar, por un lado, la alternancia, dentro de un mismo invierno, de periodos con y sin nieve en el suelo y, por otro, las desigualdades en la distribución espacial del manto de nieve. Algunos autores como Gadek (2012) y Gadek y Leszkiewicz (2009) señalan la importancia de este hecho en las variaciones espaciales de las temperaturas del suelo y en la evolución temporal interanual y la relacionan con la acusada complejidad del régimen térmico del suelo en estas áreas.

El gran número de factores que influyen en el comportamiento térmico del suelo hacen que, para poder realizar una correcta caracterización térmica de éste en un área, sea necesario disponer de series de observación de suficiente calidad, cuya longitud sea prolongada y con datos registrados siguiendo una metodología rigurosa y uniforme en el tiempo. Sólo así es posible conseguir información con un mínimo de calidad que permita derivar resultados concluyentes y comparables con los obtenidos en otros ámbitos geográficos.

En las áreas de montaña es difícil conseguir series de datos de calidad debido a las condiciones en las que se realizan las observaciones. Además, la heterogeneidad de pendientes, orientaciones, coberturas vegetales, tipos de suelo, etc. existentes, hace que los datos obtenidos sólo representen a un área muy próxima al punto de observación, por lo que, si se quiere caracterizar una mayor extensión, es necesario disponer de una red de estaciones adaptada a estos espacios, con un mayor número de puntos de medida y dotadas de equipos con capacidad para registrar variables específicas (espesor de nieve, estado del manto nivoso, contenido en agua líquida de la nieve o transporte de la nieve por el viento).

La serie de datos utilizada en este trabajo abarca el periodo 2001 - 2011 y tiene información relativa a las temperaturas del aire y del suelo a distintas profundidades (figura 22). Los datos registrados han sido sometidos a un proceso de depuración que, al final, permite disponer de la información que aparece en la figura 23.

La falta de homogeneidad en las profundidades de observación de unos años a otros, la escasa longitud de la serie, con tan solo diez años de datos, y la existencia de lagunas en las observaciones no hace posible obtener resultados concluyentes desde el punto de vista cuantitativo y presentan dificultades para ser comparados con los resultados obtenidos en otras áreas de montaña. Sin embargo, con esta información sí se puede caracterizar el comportamiento térmico en el suelo de los sectores culminantes del Macizo de forma cualitativa.

La proximidad y similitud del observatorio meteorológico del Puerto de Navacerrada (AEMET), con datos registrados de forma sistemática y continua desde 1961, permite comparar y completar las series de temperaturas del aire obtenidas en el área de estudio.

La existencia de este observatorio, la instalación de una red de estaciones meteorológicas automáticas en el Parque Natural del Macizo de Peñalara gestionadas por dicho Parque y la continuación de las observaciones en las estaciones instaladas por el Grupo de Geografía Física en Alta Montaña de la Universidad Complutense de Madrid permitirá, en un futuro, obtener resultados que caractericen completamente este Macizo.

Los resultados obtenidos a partir de los datos registrados en el suelo de las dos parcelas situadas en el sector culminante del Macizo de Peñalara, muestran cómo estas temperaturas presentan un máximo estival, coincidiendo con el momento en el que las temperaturas del aire son mayores y con los periodos en los que la radiación solar es más intensa y duradera.

En invierno, el patrón térmico del suelo está condicionado por la presencia o ausencia de un manto de nieve sobre él. Si no hay nieve sobre el suelo, éste acusa el descenso de la temperatura del aire y se enfría siguiendo un patrón temporal similar al del aire aunque atenuado, sobre todo en las capas más profundas. Si el manto de nieve está presente, las temperaturas del suelo presentan un marcado carácter isoterma en torno a 0°C. Como ya se ha comentado, en el caso del Macizo de Peñalara, al igual que en otras áreas de montaña mediterránea, son frecuentes las temporadas en las que, a lo largo del invierno, el manto de nieve presenta una acusada discontinuidad temporal y espacial, con episodios con nieve en el

suelo y otros en los que éste queda descubierto y con una distribución espacial heterogénea de la nieve. En consecuencia, el comportamiento térmico del suelo tiene una evolución temporal compleja.

El perfil y el gradiente vertical de temperaturas en el suelo también muestran destacados contrastes temporales de unos años a otros.

La existencia de dos parcelas de observación en el área de estudio permite apreciar diferencias espaciales en el patrón térmico del suelo. En términos generales, se puede concluir que las áreas en las que el manto de nieve es más duradero y profundo (sectores centrales de los nichos de nivación, caracterizados por la parcela 2) las temperaturas del suelo presentan menos oscilaciones a todas las profundidades, con temperaturas menos elevadas en verano y más suaves en invierno, mientras que donde el manto de nieve tiene menos espesor o, incluso, desaparece temporalmente (bordes del nicho, caracterizados por la parcela 1) las temperaturas del suelo tienen un comportamiento más extremo con máximas más elevadas y mínimas menores, y mayor oscilación térmica a todas las profundidades de observación. Los perfiles y el gradiente vertical de temperatura también muestran variaciones térmicas más intensas en la parcela 1 que en la 2. Todos estos resultados se pueden resumir en la conclusión de que la parcela 1 presenta un comportamiento térmico más extremo que la parcela 2.

Como en otras áreas, los procesos geomorfológicos, nivológicos, climáticos o biogeográficos presentan estrechas y complejas relaciones en el Macizo de Peñalara. La presencia de nieve facilita el desarrollo de procesos geomorfológicos ligados a la nivación, condiciona la cobertura vegetal y sus características y determina el régimen térmico del suelo. A su vez, la existencia de una vegetación determinada puede limitar el desencadenamiento de determinados procesos geomorfológicos e influir en la temperatura del suelo. Estos resultados demuestran la elevada complejidad que presentan las relaciones entre las distintas variables geoecológicas y el hecho de que muchas de estas relaciones se pueden reforzar entre sí. Por ejemplo, la disminución en la persistencia de la nieve en los nichos de nivación modifica la cobertura vegetal; por un lado ésta se densifica y, por otro, varía las condiciones ecológicas dando lugar a un cambio en la composición florística de estos espacios. A su vez, estos cambios inhiben el desarrollo de procesos geomorfológicos que favorecen la acumulación de la nieve.

Todas las conclusiones señaladas anteriormente demuestran la necesidad de continuar e incrementar los estudios relativos a las áreas de montaña mediterráneas.

La caracterización climática de estos espacios sólo es posible a partir de información registrada de forma sistemática y rigurosa. Por lo tanto, es preciso mantener las redes de observación actuales e integrar y homogeneizar los datos registrados por las redes gestionadas por distintos organismos (Universidad, Patronato del Parque Natural, AEMET).

La importancia que tienen factores como el balance radiativo, la humedad del suelo o la extensión y persistencia del manto de nieve en el comportamiento térmico del suelo de las áreas de montaña mediterránea demuestran la necesidad de realizar observaciones de estas variables que permitan definir y cuantificar esta influencia.

Las estrechas y complicadas relaciones que existen entre las distintas variables geoecológicas en el Macizo revelan la necesidad de profundizar en su estudio y conocimiento tanto de las variables en sí, como de sus interacciones.

Finalmente, las áreas de montaña, en concreto las mediterráneas, son especialmente sensibles a las posibles modificaciones que se produzcan en el clima, por lo tanto, el análisis de estos espacios y de su relación con otras áreas próximas constituye un objeto científico de interés creciente.

BIBLIOGRAFÍA

- AGUSTÍ-PANAREDA A. y THOMPSON R. (2002). Reconstructing air temperature at eleven remote alpine and arctic lakes in Europe from 1781 to 1997 AD. *Journal of Paleolimnology* Vol. 28(1). pp: 7-23.
- ALÍA, M., MENÉNDEZ, J. y VIDAL, C. (1957). Livret-Guide de l'excursion C3 et C4 Guadarrama, Massif de Peñalara et variation El Escorial-Manzanares el Real. *Actas V Congreso Internacional INQUA*. pp: 28-34.
- ANDRÉS, N. y PALACIOS, D. (2004). Interrelación Nieve / Geomorfología en la Sierra de Guadarrama: altas cuencas del Ventisquero de la Condesa y Valdemartín. *Cuadernos de Investigación Geográfica* nº30. pp: 83-113.
- ANDRÉS, N. y PALACIOS, D. (2005). Relación entre dinámica nival y erosión en el Parque Natural de Peñalara y áreas próximas. *Quintas Jornadas Científicas del Parque Natural de Peñalara y del Valle del Páular*. pp: 95-138.
- ANDRÉS, N. y PALACIOS, D. (2010). Cobertura nival y distribución de la temperatura en el suelo de las cumbres de la Sierra de Guadarrama. *Cuadernos de Investigación Geográfica* nº36. pp: 7-36.
- ANDRÉS, N., GARCÍA, A., MUÑOZ, J. y PALACIOS, D. (2007). Control of snow cover duration in geomorphologic and biogeographic dynamics in Mediterranean mountains: Manzanares valley head, Sierra de Guadarrama (Spain). *Zeitschrift für Geomorphologie* nº51(2). pp: 91-111.
- ASENSIO, I. y ONTAÑÓN, J. M. (1972). Acumulaciones periglaciares en el Valle de las Guarramillas (vertiente septentrional de la Sierra de Guadarrama). *Estudios Geológicos* nº28 (6). pp: 453-462.
- ASENSIO, I. y ONTAÑÓN, J. M. (1975). Evolución de surcos de escorrentía sobre vertientes periglaciares. *Estudios Geológicos* nº31. pp: 625-627.
- BALLANTYNE, C. K. (1978). The hydrologic significance of nivation features in permafrost areas. *Geografiska Annaler* nº60. pp: 51-54.
- BAYSSELANCE, A. (1884). Quelques traces glaciaires en Espagne. *Annuaire du Club Alpin Français*, t. X, 1983, París.
- BENISTON, M., DÍAZ, H. F. y BRADLEY, R. S. Climatic change at high elevation sites: an overview. *Climatic Change* nº 36. pp: 233-251.
- BILLINGS, W.D., BLISS, L.C. (1959). An alpine snowbank environment and its effects on vegetation, plant development, and productivity. *Ecology* nº40. pp: 388-397.
- BOSCH, J., CARRASCALI, L.M., DURÁN, L., WALKERS, S. y FISHER, M.C. (2007). Climate change and outbreaks of amphibian chytridiomycosis in a montane area of Central Spain; is there a link? *Proceedings of the Royal Society* nº274. pp: 253-260.
- BULLÓN, T. (1977). Los fenómenos periglaciares de la Sierra de la Mujer Muerta (Sierra de Guadarrama). *V Coloquio de Geografía*. Granada. pp: 35-40.
- BULLÓN, T. (1988). *El Guadarrama Occidental*. Comunidad de Madrid, Madrid.
- BULLÓN, T. (1995). Hillslope erosion, environmental changes and land management on a Spanish mountain. *Physics and Chemistry of Earth* nº20 (3/4). pp: 339-344.
- DÍAZ, H.F. y BRADLEY, R.S. (1997). Temperature variations during the last century at high elevation sites. *Climatic Change* nº36. pp: 253-279.
- DOZIER, J. (1989). Estimation of properties of alpine snow from Landsat Thematic Mapper. *Advanced Space Research* nº9. pp: 207-215.

- DOZIER, J. y PAINTER, T.H. (2004). Multispectral and hyperspectral remote sensing of alpine snow properties. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* nº32. pp: 465-494.
- FARBROT, H., FLORIAN, T., ETZELMÜLER, B., ISAKSEN, K., STRAND, R., VIKHAMAR, T. y HUMLUM, O. (2011). Air and Ground Temperature Variations Observed along Elevation and Continentality Gradients in Southern Norway. *Permafrost and Periglacial Processes* nº 22. pp: 343-360.
- FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, F. (1988). Estudio florístico y fitosociológico del Valle del Paular (Madrid). Tesis doctoral sin publicar, Facultad de Biología, Universidad Complutense, Madrid.
- FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, F. (1991). La vegetación del Valle del Paular (Sierra de Guadarrama, Madrid), I. Lazaroa nº12. pp: 153-272.
- FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, F. (1999). La flora y la vegetación del Parque Natural de Peñalara y del Valle del Paular (Madrid): implicaciones en la conservación de la biodiversidad. Primeros encuentros científicos del Parque Natural de Peñalara y del Valle del Paular. pp: 179-196.
- FONT, I. (1983). Climatología de España y Portugal. Universidad de Salamanca.
- FRANZLE, O. (1959). Glaziale und periglaziale formbildung im östlichen kastilischen scheidegebirge Zentral-Spain. *Bonner Geographische Abhandlungen*, Bonn.
- GADEK, B. (2012). Debris slopes ventilation in the periglacial zone of the Tatra Mountains (Poland and Slovakia): The indicators. *Cold Regions Science and Technology* nº 74-75. pp: 1-10.
- GADEK, B. y KEDZIA, S. (2008). Winter Ground Surface Temperature Regimes in the Zone of Sporadic Discontinuous Permafrost, Tatra Mountains (Poland and Slovakia). *Permafrost and Periglacial Processes* nº 19. pp: 315-321.
- GADEK, B. y LESZKIEWICZ, J. (2010). Influence of snow cover on ground surface temperature in the zone of sporadic permafrost, Tatra Mountains, Poland and Slovakia. *Cold Regions Science and Technology* nº 60. pp: 205-211.
- GARCÍA, A. y MUÑOZ, J. (2010). Modificaciones recientes de la cubierta nival y evolución de la vegetación supraforestal en la Sierra de Guadarrama, España. El puerto de los Neveros. *Cuadernos de Investigación Geográfica* nº 36. pp: 109-143.
- GARCÍA, A., MUÑOZ, J., ANDRÉS, N. y PALACIOS, D. (2009). Relationship between climate change and vegetation distribution in the Mediterranean mountains: Manzanares Head valley. Sierra de Guadarrama. (Central Spain). *Earth and Environmental Science. Climatic Change* Vol. 100 nº 3-4. pp: 645-666.
- GARDNER, J. (1969). Snowpatches: their influence on mountain wall temperatures and the geomorphologic implications. *Geografiska Annaler* nº51A. pp: 114-120.
- GAVILÁN, R., FERNÁNDEZ GONZÁLEZ, F. y BLASIC, C. (1998). Climatic classification and ordination of the Spanish Sistema Central: relationships with potential vegetation. *Plant Ecology* nº139. pp: 1-11.
- GIMÉNEZ - BENAVIDES, L., GARCÍA, R. y ESCUDERO, A. (2005). Plantas de alta montaña mediterránea ¿cómo enfrentarse al cambio climático?. Quintos encuentros científicos del Parque Natural de Peñalara y del Valle del Paular. pp: 149-157.
- GRAWE, O.R. (1936). Ice as agent of rock weathering: a discussion. *Journal of Geology* Vol. 44 nº2, Part I. pp: 173-182.
- HALL, K. (1980). Freeze-thaw activity at nivation site in northern Norway. *Artic and Alpine Research* nº12. pp: 183-194.
- HERRERO, J., POLO, M.J., MOÑINO, A. y LOSADA, M.A. (2009). An energy balance snowmelt model in a Mediterranean site. *Journal of Hydrology* nº 371. pp: 98-107.

- HOBBS, W.H. (1910). The cycle of mountain glaciation. *The Geographical Journal* nº35. pp: 146-163 y 268-284.
- IPCC. (2008). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- ISHIKAWA, M. (2003). Thermal regimes at the snow - ground interface and their implications for permafrost investigation. *Geomorphology* nº 52. pp: 105-120.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA (2002). *Valores normales y estadísticos de observatorios meteorológicos principales*. Ministerio de Medio Ambiente.
- IZQUIERDO, J.L. (2005). Cartografía de la vegetación del Parque Natural de Peñalara y su zona periférica de protección: Una herramienta para la gestión. *Quintos encuentros científicos del Parque Natural de Peñalara y del Valle del Páular*. pp: 83-92.
- KÖNIG, M., WINTHER, J.G. y ISAKSSON, E. (2001). Measuring snow and glacier ice properties from satellite. *Reviews of Geophysics* nº39(1). pp: 1-27.
- KYSELY J. y DUBROVSKY M. (2005). Simulation of extreme temperature events by a Stochastic Weather Generator: Effects of Interdiurnal and Inerannual Variability Reproduction. *International Journal of Climatology* nº25. pp: 251-269.
- LANA, X., MARTÍNEZ, M.D., BURGUEÑO, A., SERRA, C., MARTÍN-VIDE, J. y GÓMEZ, L. (2006). Distributions of long dry spells in the Iberian Peninsula, years 1951-1990. *International Journal of Climatology* nº26. pp: 1999-2021.
- LARREA, N., ALONSO, C., HINOJAL, J.A., MORENO, V. y PÉREZ, L. (2003). Estudio multitemporal de las masas de nieve en la cuenca de Tajo mediante imágenes NOAA-AVHRR. En Pérez, R. y Martínez, P. (Coord.) *Teledetección y Desarrollo Regional. Actas X Congreso de Teledetección*. pp: 135-138.
- LUCEÑO, M. y VARGAS, P. (1991). *Guía botánica del Sistema Central español*, Ed. Pirámide. Madrid.
- MACKAY J.R. y MACKAY, D.K. (1974). Snow cover and ground temperatures, Garry Island, N.T.W. *Arctic Vol. 27* nº4. pp: 287-296.
- MACPHERSON, J. (1893). Fenómenos glaciares en San Ildefonso (Segovia). *Actas de la Sociedad Española de Historia Natural*, tomo XXII.
- MANRIQUE, E. y FERNÁNDEZ-CANCIO, A. (2000). Extreme Climatic Events in Dendroclimatic Reconstructions from Spain. *Climatic Change Vol. 44* nº1-2. pp: 123-138.
- MARCOS, J. y PALACIOS, D. (2004). Efectos de la nieve y la temperatura del suelo en la actividad geomorfológico: primeros resultados de su monitorización en la Sierra de Guadarrama (España). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sección Geología)* nº99 (1-4). pp: 25-36.
- MARTÍNEZ DE PISÓN, E. y PALACIOS, D. (1998). Significado del episodio glacial en la evolución morfológica y en el paisaje de la Sierra de Gredos. Sistema Central. En: Gómez Ortiz, A., Pérez Alberti, A. (Eds.), *Las Huellas Glaciares de las Montañas Españolas*. Geoforma. pp: 163-207.
- MARTÍNEZ MOLINA, I. ALARCÓN, S. y MARTÍNEZ, M.T. (1984). *Climatología de Puerto de Navacerrada*. Instituto Nacional de Meteorología. Ministerio de Transporte, Turismo y Comunicaciones.
- MATSUOKA, N. (1998). The role of diurnal, annual and millennial freeze - thaw cycles in controlling alpine slope instability. In: Lewkowickz, A.G., Allard, M. (Eds.), *Proceedings of the Seventh International Conference on Permafrost* (June 23- 27, Yellowknife, Canada). Centre d'E´tudes Nordiques, Université Laval, Sainte- Foy. pp. 711-717.

- MORENO, I., RUIZ, A., MARTURIÀ, J., OLLER, P., PIÑA, J., GARCÍA, C., MARTÍNEZ, P., y TALAYA, J. (2009a). Snowpack depth modelling and water availability from LIDAR measurements in eastern Pyrenees. International Snow Science Workshop. pp: 202-206.
- MORENO, I., RUIZ, A., MARTURIÀ, J., OLLER, P., PIÑA, J., GARCÍA, C., MARTÍNEZ, P., y TALAYA, J. (2009b). Aplicabilidad de la técnica LIDAR para la modelización del espesor del manto nivoso mediante SIG. En Montesinos, S. y Fernández, L. (Ed.) Teledetección: Agua y Desarrollo Sostenible. Actas del XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. pp: 529-532.
- MORIN, S., LEJEUNE, Y., LESAFFRE, B., PANEL, J.M., PONCET, D., DAVID, P. y SUDUL, M. (2012). A 18-years long snow and meteorological dataset from a mid-altitude mountain site (Col de Porte, France) for driving and evaluating snowpack models. Meteo-France / CNRS.
- MUÑOZ, J. (2000). El factor climático en los paisajes de montaña españoles. En Martínez de Pisón, E.: Estudios sobre paisaje. Fundación Duques de Soria y Universidad autónoma de Madrid. pp: 75-84.
- MUÑOZ, J. y GARCÍA, A. (2004). Modificaciones climáticas y evolución de la cubierta vegetal en las áreas culminantes de la Sierra de Guadarrama (Sistema Central Español) durante la segunda mitad del siglo XX: las altas cuencas del Ventisquero de la Condesa y Valdemartín. Cuadernos de Investigación Geográfica nº30. pp: 117-146.
- MUÑOZ, J. y GARCÍA, A. (2009). Plant colonization in Condesa nivation hollow, Sierra de Guadarrama (Spanish Central System). Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography Vol. 91. pp: 189-204.
- MUÑOZ, J., PALACIOS, D. y MARCOS, J. (1995). The influence of the geomorphologic heritage on present slope dynamics. The Gredos Cirque, Spain. Pirineos nº145-146. pp: 35-63.
- MUÑOZ, J., GARCÍA, A., ANDRÉS, N. y PALACIOS, D. (2007). La vegetación del ventisquero de la Condesa (Sierra de Guadarrama, Madrid) y sus condicionantes termo - nivales. Boletín AGE nº 44. pp: 29-52.
- NOLIN, A.W. y DOZIER, J. (1993). Estimating snow grain size using AVIRIS data. Remote Sensing of Environment nº 44. pp: 231-238.
- NYBERG, R. (1991). Geomorphic processes at snowpatch sites in the Abisko mountains, northern Sweden. Zeitschrift fur Geomorphologie nº35(3). pp: 321-343.
- OBERMAIER, H. y CARANDELL, J. (1917). Los glaciares cuaternarios de la Sierra de Guadarrama, Trabajos del Museo Nacional de Ciencias Naturales nº19. pp: 1-92.
- PALACIOS, D. y GARCÍA, M. (1997a). The influence of geomorphologic heritage on present nival erosion: Peñalara, Spain. Geografiska Annaler nº79. pp: 25-40.
- PALACIOS, D. y GARCÍA, M. (1997b). The Distribution of High Mountain Vegetation in relation to snow cover: Peñalara, Spain. Catena nº30. pp: 1-40.
- PALACIOS, D. y ANDRÉS, N. (2000). Morfodinámica supraforestal actual en la Sierra de Guadarrama y su relación con la cubierta nival: el caso de Dos Hermanas- Peñalara. En: Procesos y formas periglaciares en la montaña mediterránea. J.L. Peña, M. Sánchez-Fabre, Lozano, M.V. Eds. pp: 235-264. Instituto de Estudios Turolenses, Teruel.
- PALACIOS, D. y ANDRÉS, N. (2005). Relación entre dinámica nival y erosión en el Parque Natural de Peñalara y áreas próximas. Quintos encuentros científicos del Parque Natural de Peñalara y del Valle del Paular. pp: 95-137.
- PALACIOS, D., ANDRÉS, N. y LUENGO, E. (2003). Distribution and effectiveness of nivation in Mediterranean mountains: Peñalara (Spain). Geomorphology, nº54. pp: 157-178.

- PALACIOS, D., ANDRÉS, N. y LUENGO, E. (2004). Tipología y evolución de nichos de nivación en la Sierra de Guadarrama, España. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sección Geología)* nº99 (1-4). pp: 141-158.
- PALACIOS, D., ANDRÉS, N., MARCOS, J. y VÁZQUEZ-SELEM, L. (2012). Glacial landforms and their paleoclimatic significance in Sierra de Guadarrama, Central Iberian Peninsula. *Geomorphology* nº 139 -140. pp: 67-78.
- PEDRAZA, J. (1994). Sistema Central. En Gutiérrez Elorza, M. *Geomorfología de España*. Editorial Rueda. pp: 63-96.
- PEDRAZA, J., CARRASCO, R.M., MARTÍN-DUQUE, J.F. y SANZ, M.A. (2004). El Macizo de Peñalara (Sistema Central Español). Morfoestructura y modelado. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sección Geología)* nº99 (1-4). pp: 185-196.
- PINTADO, A. y SANCHO, L.G. (2005). Influencia de la cubierta nival en el microclima y en la vegetación de alta montaña del Parque Natural de Peñalara. *Quintas Jornadas Científicas del Parque Natural de Peñalara y del Valle del Páular*. pp: 139-145.
- PRADO, C. de (1864). Descripción física y geológica de la provincia de Madrid. Junta General de Estadística, Madrid. (2ª ed. 1975, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid).
- RAPP, A. (1960). Recent developemnt of mountain slopes in Kärkevagge and sorroundings, north Scandinavia. *Geografiska Annaler* nº42. pp: 65-200.
- REYNOLDS, R.C. (1971). Clay mineral formation in an alpine environment. *Clays and Clay Minerals* nº19. pp: 361-374.
- RIVAS-MARTÍNEZ, S. (1963). Estudio de la Vegetación y Flora de las Sierras de Guadarrama y Gredos. *Anales del Instituto Botánico Cavanilles* nº 21 (1). pp: 5-325.
- RIVAS-MARTÍNEZ, S. (1982). Mapa de las series de vegetación de la provincia de Madrid. Escala 1:200.000. Publicaciones del Servicio Forestal del Medio Ambiente y contra Incendios, Diputación Provincial Madrid.
- RIVAS-MARTÍNEZ, S., FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, F., SÁNCHEZ-MATA, D. y PIZARRO, J. (1990). Vegetación de la Sierra de Guadarrama. Guía geobotánica de la Excursión de las II Jornadas de Taxonomía Vegetal. *Itinera Geobotanica*. Vol. 4. Asociación Española de Fitosociología, Madrid.
- RIVAS-MARTÍNEZ, S., CANTÓ, B.P., FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, F., MOLINA, J.A., PIZARRO, J. y SÁNCHEZ-MATA, D. (1999). Synopsis of the Sierra de Guadarrama Vegetation. *Itinera Geobotánica* nº13. pp: 189-206.
- ROSENTHAL, W. y DOZIER, J. (1996). Automated mapping of montane snow cover at subpixel resolution from the Landsat Thematic Mapper. *Water Resources Research* nº32. pp: 115-130.
- SALVADOR, F., GÓMEZ, A., SALVA, M. y PALACIOS, D. (2011). Caracterización térmica de la capa activa en un glaciar rocoso en medio periglacial de alta montaña mediterránea. El ejemplo del Corral del Veleta (Sierra Nevada, España) (Periodo de observación: 1998-99/2008-09). *Cuadernos de Investigación Geográfica* nº 37. pp: 25-48.
- SANZ, C. (1979). El Mosaico de geofacies supraorientales en la zona más elevada de la Sierra de Guadarrama. *Actas del VI Coloquio de Geografía*. pp: 240-247.
- SANZ, C. (1986). Periglacialismo en montaña: La Sierra de Guadarrama. En Martínez de Pisón, E. and Tello Ripa, B. (Edit.). *Atlas de Geomorfología*, Alianza Editorial. Madrid. pp: 239-254.
- SANZ, C. (1988). El relieve del Guadarrama oriental. *Consejería de Política Territorial. Comunidad Autónoma de Madrid*. Madrid.

- SANZ-ELORZA, M., DANA, E.D., GONZÁLEZ, A. y SOBRINO, E. (2003). Changes in the high-mountain vegetation of the Central Iberian Peninsula as a probable sign of Global Warming. *Annals of Botany* nº92. pp: 273-280.
- SOKRATOV, S. y BARRY, R. (2002). Intraseasonal variation in the thermoinsulation effect of snow cover on soil temperatures and energy balance. *Journal of Geophysical Research* nº107.
- STRÖMQUIST, L. (1985). Geomorphic impact of snowmelt on slope erosion and sediment production. *Zeitschrift für Geomorphologie* nº29. pp: 129-138.
- TELES, G., MORA, C. y RAMOS, M. (2003). Ground temperature regimes and geomorphological implications in a Mediterranean mountain (Serra da Estrela, Portugal). *Geomorphology* nº52. pp: 57-72.
- TENA, F. y TINAUT D. (1986). Solar Radiation in Spain. *Journal of Climatology* nº6. pp: 53-68.
- THORN, C. E. (1976). Quantitative evaluation of nivation in the Colorado Front Range. *Geological Society of America Bulletin* nº87. pp: 1169-1178.
- THORN, C. E. (1978). A preliminary assessment of the geomorphic role of Pocket Gophers in the Alpine Zone of the Colorado Front Range. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography* Vol. 60 nº3/4. pp: 181-187
- THORN, C. E. (1979). Ground temperatures and surficial transport in colluvium during snowpatch; Colorado Front Range. *Earth Surface Processes* nº4. pp: 211-228.
- THORN, C. E. y HALL, K. (1980). Nivation: an arctic- alpine comparasion and reappraisal. *Journal of Glaciology* nº25. pp: 109-124.
- VIDAL BOX, C. (1948). Nuevas aportaciones al conocimiento geomorfológico de la Cordillera Central. *Estudios Geográficos* nº30. pp: 5-52.
- WASHBURN, A.L. (1979). *Geocryology. A Survey of Periglacial Processes and Environments*. Edward Arnold, London.
- WHITE, S. E. (1976). Is frost action really only hydration shattering? A review. *Arctic and Alpine Research* nº 9. pp: 1-6.
- WILLIAMS, J. E. (1949). Chemical weathering at low temperatures. *Geographical Review* nº39. pp: 129-135.
- WMO, (2008). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. WMO nº8. Geneva 2. Switzerland.
- WMO, (2011). *Guide to Climatological Practices* WMO nº100. Geneva 2. Switzerland.

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Localización geográfica del Parque Natural de Peñalara en el contexto de la Península Ibérica y del Sistema Central.	3
2	Localización del área de estudio.	6
3	Mapa geomorfológico del área de estudio en el Circo de la Laguna de Peñalara.	10
4	Localización de la estación meteorológica del Puerto de Navacerrada.	16
5	Ubicación del jardín meteorológico y equipos de medida del observatorio de Navacerrada.	17
6	Representación del la evolución anual de la temperatura media y media de las máximas y media de las mínimas mensuales.	17
7	Representación del la evolución anual de la precipitación media y máxima mensual.	18
8	Representación del la evolución anual de la insolación media mensual.	18
9	Representación del la evolución anual del número medio de días de ocurrencia de precipitación, nieve, niebla, tormenta, granizo y helada.	19
10	Evolución de distintas variables meteorológicas en el observatorio de Navacerrada. Periodo 1961 - 2010. Temperaturas medias mensuales y sus líneas de evolución.	22
11	Evolución de distintas variables meteorológicas en el observatorio de Navacerrada. Periodo 1961 - 2010. Precipitación total anual y línea de su evolución.	22
12	Evolución de distintas variables meteorológicas en el observatorio de Navacerrada. Periodo 1961 - 2010. Número de días de precipitación y línea de su evolución.	23
13	Evolución de distintas variables meteorológicas en el observatorio de Navacerrada. Periodo 1961 - 2010. Número de días con precipitación en forma de lluvia y línea de su evolución.	23
14	Evolución de distintas variables meteorológicas en el observatorio de Navacerrada. Periodo 1961 - 2010. Número de días con precipitación en forma de nieve y línea de su evolución.	23
15	Evolución de distintas variables meteorológicas en el observatorio de Navacerrada. Periodo 1961 - 2010. Número de días con nieve en el suelo y línea de su evolución.	24
16	Evolución, por estaciones, de la temperatura media, el número de días con nieve en el suelo y el número de días con precipitación en forma de nieve y de sus líneas de tendencias en el observatorio de Navacerrada. Periodo 1961 - 2010.	25
17	Ejemplos de acumulación asimétrica de la nieve en las cumbres de Guadarrama. Febrero 2012.	32
18	Mapa geomorfológico del nicho nival de Dos Hermanas en el Circo de la Laguna de Peñalara.	34
19	Aspecto de las cornisas que se forman en la cabecera del nicho de Dos Hermanas. 05/04/2011.	34
20	Resumen de las características y dinámica de los nichos nivales en Dos Hermanas en el Circo de la Laguna de Peñalara.	36
21	Localización de las parcelas de observación.	41
22	Resumen de la existencia de datos.	42
23	Serie resultantes de la depuración de los datos originales.	44
24	Resumen de los valores de temperatura media y extrema del aire por años.	47
25	Temperatura media y extrema diaria del aire.	47
26	Temperatura media, media de las extremas mensual y extremas absolutas del aire.	48
27	Evolución de las temperaturas medias diarias. Temporada 2001/2002.	49
28	Evolución de las temperaturas medias diarias. Temporada 2002/2003.	50
29	Evolución de las temperaturas medias diarias. Temporada 2003/2004.	51
30	Evolución de las temperaturas medias diarias. Temporada 2005/2006.	52
31	Evolución de las temperaturas medias diarias. Temporada 2007/2008.	53
32	Evolución de las temperaturas medias diarias. Temporada 2009/2010.	54
33	Evolución de las temperaturas medias diarias. Temporada 2010/2011.	55

Figura		Página
34	Temperaturas (°C) medias diarias de los días 21 a 30 de mayo de 2002 en las estaciones de estudio.	57
35	Mapas de temperatura en 800 hPa correspondientes a los días 21, 23, 25, 27 y 29 de mayo de 2002.	58
36	Valores medios y extremos mensuales de la temperatura del suelo. Temporada 2001-2002.	60
37	Valores medios y extremos mensuales de la temperatura del suelo. Temporada 2002-2003.	61
38	Valores medios y extremos mensuales de la temperatura del suelo. Temporada 2003-2004.	62
39	Valores medios y extremos mensuales de la temperatura del suelo. Temporada 2005-2006.	63
40	Valores medios y extremos mensuales de la temperatura del suelo. Temporada 2007-2008.	64
41	Valores medios y extremos mensuales de la temperatura del suelo. Temporada 2009-2010.	65
42	Valores medios y extremos mensuales de la temperatura del suelo. Temporada 2010-2011.	66
43	Diferencia entre los valores de temperatura media mensual y estacional de las dos parcelas de observación.	67
44	Variación vertical de las temperaturas medias estacionales. Temporada 2001 - 2002.	70
45	Variación vertical de las temperaturas medias estacionales. Temporada 2002 - 2003.	71
46	Variación vertical de las temperaturas medias estacionales. Temporada 2003 - 2004.	72
47	Variación vertical de las temperaturas medias estacionales. Temporada 2005 - 2006.	73
48	Variación vertical de las temperaturas medias estacionales. Temporada 2007 - 2008.	74
49	Variación vertical de las temperaturas medias estacionales. Temporada 2009 - 2010.	75
50	Variación vertical de las temperaturas medias estacionales. Temporada 2010 - 2011.	76
51	Variación vertical de las temperaturas medias estacionales.	77
52	Gradientes verticales de temperatura por estaciones y temporadas.	78
53	Oscilación térmica media mensual a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2001 - 2002.	81
54	Oscilación térmica media mensual a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2002 - 2003.	81
55	Oscilación térmica media mensual a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2003 - 2004.	81
56	Oscilación térmica media mensual a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2005 - 2006.	82
57	Oscilación térmica media mensual a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2007 - 2008.	82
58	Oscilación térmica media mensual a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2009 - 2010.	82
59	Oscilación térmica media mensual a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2010 - 2011.	83
60	Número mensual de días con temperatura del suelo inferior a 0°C a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2001 - 2002.	85
61	Número mensual de días con temperatura del suelo inferior a 0°C a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2002 - 2003.	85
62	Número mensual de días con temperatura del suelo inferior a 0°C a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2003 - 2004.	86
63	Número mensual de días con temperatura del suelo inferior a 0°C a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2005 - 2006.	86
64	Número mensual de días con temperatura del suelo inferior a 0°C a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2007 - 2008.	86
65	Número mensual de días con temperatura del suelo inferior a 0°C a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2009 - 2010.	87
66	Número mensual de días con temperatura del suelo inferior a 0°C a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros. Temporada 2010 - 2011.	87
67	Número de ciclos hielo - deshielo por temporada a las profundidades de 10, 20, 50 y 80 centímetros.	88